

Mesure de l'indice foliaire en forêt

Nathalie Bréda

Kamel Soudani

Jean-Claude Bergonzini

ECOFOR

Avant-propos

L'indice foliaire des peuplements forestiers, s'il est largement admis au niveau scientifique comme étant un paramètre clé du fonctionnement des couverts, n'est pas mesuré en routine comme descripteur des peuplements ni en France ni en Europe. En particulier, ce paramètre n'est pas disponible sur les placettes de suivi à long terme des écosystèmes forestiers ni en France (RENECOFOR) ni en Europe (réseau européen). Il n'est pas non plus utilisé dans le cadre de la surveillance de l'état sanitaire des forêts (DSF), dans la gestion (ONF), dans l'inventaire de la ressource forestière (IFN) ou dans le développement forestier (IDF). Par contre, les calculs de bilan de carbone des forêts ou de bilans hydrologiques utilisent l'indice foliaire comme paramètre moteur des flux (fixation du CO₂, évapotranspiration). Une raison essentielle à ce décalage est certainement la difficulté de mesure de l'indice foliaire des couverts forestiers, qui reste encore très "confidentiel" dans le domaine forestier européen. Ce n'est pas le cas aux Etats-Unis et au Canada, où un effort réel de généralisation de l'acquisition de ce paramètre a été réalisé ces dernières années. On peut citer en exemple l'impulsion donnée par le gouvernement canadien pour la généralisation de l'utilisation de photographies hémisphériques, en finançant le développement et la diffusion de logiciels de traitements ou encore en soutenant l'établissement de cartes nationales d'indices foliaires. Pourtant, l'indice de surface foliaire peut caractériser précisément un état sanitaire, une sylviculture, une perturbation des peuplements. C'est aussi un élément important de l'extrapolation de mesures écophysiologiques et biogéochimiques locales détaillées (telles que celles réalisées sur les sites ateliers) à d'autres peuplements. C'est encore potentiellement un facteur de changement d'échelle du peuplement au massif forestier ou à la région.

En octobre 1998, deux journées de travail organisées conjointement par le GIP ECOFOR et les responsables français des réseaux de suivi des écosystèmes forestiers (ONF pour RENECOFOR, DERF pour le réseau européen) ont réuni des scientifiques de différents organismes (Université, ENGREF, CEMAGREF, INRA, CNRS, ONF, DSF) (Paris, 1-2 octobre 1998). A l'issue des discussions, l'indice foliaire des couverts forestiers tempérés est apparu comme un paramètre clé du suivi à long terme des écosystèmes forestiers mais posant de réels problèmes métrologiques, limitant une utilisation plus générale de ce paramètre. Ces difficultés de mesures, tant pour l'indice foliaire que pour des variables actuellement utilisées comme alternatives (transparence de houppier, pertes foliaires, biomasses de litières), sont actuellement à l'ordre du jour en termes d'assurance qualité des mesures et observations réalisées dans les réseaux de placettes permanentes. En effet, la qualité des observations ou des mesures est fondamentale pour la fiabilité du suivi à long terme sur un vaste territoire (France, Europe) : la reproductibilité des observations dans le temps et dans l'espace doit pouvoir être garantie.

Une littérature internationale abondante et récente traite des contraintes techniques de mesure de l'indice foliaire et d'autres paramètres de structure du couvert, avec une large panoplie d'approches. Les critiques et conclusions tirées par les auteurs quant aux performances d'une méthode par rapport à l'autre sont souvent étroitement liées aux objectifs de la mesure et par conséquent difficiles à généraliser. Le manque évident de synthèse récente sur cet aspect de métrologie forestière, qui évolue rapidement, a motivé ce travail financé par le GIP ECOFOR.

L'objectif finalisé de cette synthèse bibliographique est de proposer un précis méthodologique à l'usage des utilisateurs (personnels ONF, CRPF, DSF, IDF...) dans le double objectif de leur permettre de choisir la méthode la plus adaptée à leur objet d'étude et d'éclairer leur choix selon des critères de coût et de temps à investir dans les mesures. A terme, une mesure de qualité des paramètres de structure des couverts forestiers devrait se "démocratiser". Ce travail doit aussi être le support d'une réflexion des gestionnaires français de réseaux de surveillance des forêts quant aux alternatives possibles pour le suivi à long terme de l'indice foliaire ou LAI¹.

Notre document s'est voulu aussi complet que possible tant du point de vue théorique que des équipements. Il comporte plusieurs parties, que le lecteur pourra parcourir indépendamment selon ses connaissances et ses besoins. Un retour vers les aspects théoriques sera souvent souhaitable pour comprendre les calculs proposés par les différents appareils ou logiciels.

Bonne lecture et surtout bonnes mesures !

¹ L'indice foliaire sera dans la suite indifféremment remplacé par l'abréviation du terme anglophone Leaf Area Index notée LAI .

SOMMAIRE

Chapitre 1. Pourquoi s'intéresser à l'indice foliaire des couverts forestiers ? 7

1. Principaux rôles fonctionnels des couverts forestiers	7
1.1. Structure du couvert et bilan hydrique	7
1.2. Structure du couvert et bilan d'assimilation	8
1.3. Structure du couvert et cycle biogéochimique	9
1.4. Productivité des écosystèmes forestiers	10
2. Comment accéder au paramètre indice foliaire	13

Chapitre 2. Bases méthodologiques 21

1. Introduction	21
2. Organisation du feuillage	21
2.1. L'indice de surface foliaire	21
2.2. Répartition spatiale des feuilles	24
2.3. La position angulaire des feuilles	25
2.3.1. La position angulaire des feuilles	27
2.3.2. Distribution des inclinaisons	27
3. Interception du feuillage par un faisceau de direction D	29
3.1. Projection du feuillage par un faisceau de direction D	30
3.2. Contact entre le feuillage et une sonde de direction D	33
3.3. Fraction ou fréquence de trouées	35
3.3.1. Dispersion aléatoire	35
3.3.2. Autres systèmes de dispersion	37
4. Estimations de l'indice foliaire et de l'inclinaison moyenne	39
4.1. Estimation de l'indice foliaire	39
4.1.1. Formulation des équations de base	39
4.1.2. Résolution matricielle	39
4.2. Autres méthodes d'estimation	41
4.2.1. Modèle ELP (<i>Ellipsoidal Inversion</i>)	41
4.2.2. Les méthodes proposées par Lang	42
4.3. Estimation de l'angle d'inclinaison	44
5. Rappels sur le comportement des radiations lumineuses	44
5.1. Nature de la lumière	45
5.2. Les flux	46
5.2.1. L'angle solide	46
5.2.2. Définition des paramètres associés aux flux	46
5.3. Les mesures	48
5.4. Le rayonnement solaire	49
5.4.1. Le rayonnement solaire 1 : l'évolution du spectre	49
5.4.2. Le rayonnement solaire 2 : les trajectoires du soleil	51
5.4.3. Le rayonnement solaire 3 : l'altération du rayonnement	52
5.5. Les rencontres	54
6. Le bilan radiatif et l'ambiance des bilans radiatifs	55
6.1. Principes généraux des bilans radiatifs	55
6.2. Interception du flux incident	56
Conclusion	57

Chapitre 3. Méthodes d'estimation de l'indice foliaire et autres paramètres de structures dans les couverts forestiers 59

Introduction	59
1. Méthodes directes	60
1.1. Recueil de litière	60

1.2. Méthodes allométriques	63
1.3. Méthodes des aiguilles	68
2. Méthodes indirectes	68
2.1. Utilisation de la loi de Beer-Lambert	70
2.2. Analyseur de couvert LAI-2000	71
2.3. DEMON	75
2.4. SunScan Canopy Analysis system	77
2.5. LAIMETRE LEGER (LAIL)	80
2.6. Photographies hémisphériques	83
2.6.1. Principes de la technique des photographies hémisphériques	84
2.6.2. Acquisition et traitement de photographies hémisphériques sous forêts	86
2.6.3. Systèmes d'acquisition et de traitement des photographies hémisphériques	88
2.6.4. Logiciels de traitements de photographies hémisphériques	91
Conclusion	92
Chapitre 4. Potentialités offertes par la télédétection pour l'étude de la structure des canopées forestières	93
Introduction	93
1. Propriétés optiques de la végétation et du sol	97
1.1. Propriétés optiques des feuilles	97
1.2. Propriétés optiques des parties corticales	100
1.3. Propriétés optiques du sol	100
2. Propriétés optiques du couvert végétal	101
3. Relations entre l'information radiométrique et la structure des couverts forestiers	102
3.1. Indices de végétation radiométriques	103
3.2. Modèles de transfert radiatif	108
4. Apports de la télédétection en hyperfréquences RADAR pour l'étude de la structure des couverts forestiers	110
Conclusion	112
Chapitre 5. Problèmes posés par les méthodes indirectes optiques et tendance de développement	113
Introduction	113
1. Mesure de l'agrégation foliaire dans les couverts forestiers	115
1.1. Mesures du facteur d'agrégation foliaire e	115
1.2. Mesures du facteur d'agrégation e	118
1.2.1. Planimètres optiques et systèmes d'analyse d'images	120
1.2.2. Méthode de déplacement de volume	122
2. Indice de bois ou indice de surface non photosynthétique	122
Conclusion	123
Conclusion générale. Réflexions à propos du choix du descripteur du couvert dans diverses applications forestières	125
Bibliographie	129
Annexe 1	145
Annexe 2	147

Chapitre 1

Pourquoi s'intéresser à l'indice foliaire des couverts forestiers ?

Le couvert intervient dans le fonctionnement des écosystèmes forestiers de manière biophysique, en pilotant la disponibilité des facteurs climatiques, et de manière physiologique, en intervenant comme interface d'échange capable de régulation. En tant qu'interface d'échange entre le sol et l'atmosphère, tous les phénomènes d'interception, qu'ils concernent le rayonnement, les précipitations (pluie, brouillard ou neige) ou encore les dépôts atmosphériques, sont étroitement liés au degré de fermeture du couvert et à sa surface foliaire. Ainsi, le microclimat lumineux, sous ses aspects thermique et hydrique, est-il largement contrôlé par les caractéristiques du couvert forestier. Par ailleurs, les échanges dynamiques, de flux d'eau et de carbone entre le couvert et l'atmosphère, et d'éléments minéraux avec le sol, dans le cycle biogéochimique des écosystèmes, sont dépendants de la surface foliaire du couvert des peuplements. C'est d'ailleurs dans cette optique que les retombées annuelles de litières sont quantifiées sur certaines placettes du réseau européen de surveillance de l'état sanitaire des forêts¹.

1. Principaux rôles fonctionnels des couverts forestiers

1.1. Structure du couvert et bilan hydrique

L'indice foliaire des peuplements forestiers est le paramètre clé qui détermine à la fois la quantité d'eau de pluie qui est interceptée par le couvert, la quantité d'eau qui est transpirée par le peuplement, et l'énergie disponible au niveau du sol et de la strate herbacée pour l'évapotranspiration du sous-étage.

L'interception des précipitations par le couvert forestier est l'une des grandes différences fonctionnelles avec les couverts agronomiques ou herbacés. En effet, et ceci essentiellement pour des raisons de structure et de dimensions, les couverts forestiers interceptent une quantité importante des précipitations incidentes (de l'ordre de 30 à 60 % des pluies incidentes pour les résineux, 20-30 % pour les feuillus), ce qui réduit donc significativement la quantité d'eau participant à la reconstitution des réserves des sols. Les travaux d'Aussenac (1968), Aussenac (1975), Aussenac et Boulangeat (1980), Aussenac et *al.* (1995) notent que l'interception des pluies par un couvert forestier est contrôlée par sa structure. Sous une précipitation quelconque, la quantité d'eau atteignant le sol est proportionnelle à la fraction de trouées du couvert. Son complément est donc intercepté par le

¹ En France, les placettes du réseau européen concernées par les collectes de litières (aussi appelées placettes de niveau II) sont regroupées dans RENECOFOR (REseau National de suivi à long terme des ECosystème FOREstiers).

feuillage. Une partie de cette quantité de pluie interceptée est perdue par évaporation directe et une autre partie s'écoule des feuilles et le long des troncs pour atteindre le sol par égouttement. L'interception des pluies dépend du type et de l'intensité des précipitations, mais elle est aussi fortement liée aux caractéristiques structurales du couvert telles que la forme, l'orientation, l'inclinaison, la surface et la dispersion des éléments foliaires. La modélisation de l'interception par les couverts forestiers est une opération difficile, en raison du nombre important de facteurs structuraux et climatiques contrôlant ce flux. Sa quantification pour un peuplement particulier est toutefois possible, en prenant soin de séparer les phases phénologiques au cours de l'année. Signalons aussi que la fraction de pluie non interceptée par le feuillage peut s'exprimer par une fonction décroissante de l'indice foliaire (Chassagneux et Choissnel, 1986).

La transpiration du couvert résulte de la transpiration de l'ensemble des feuilles qui le constitue : le facteur de changement d'échelle entre la feuille et le couvert pour l'évapotranspiration est l'indice foliaire du couvert. Différentes estimations expérimentales reprises dans Granier *et al.* (1999) et dans la synthèse de Bréda (1999) définissent, lorsque la disponibilité en eau n'est pas limitante, la transpiration maximale de divers couverts forestiers en fonction de leur indice foliaire. Ainsi, plus l'indice foliaire d'un couvert forestier est élevé, plus sa consommation en eau est forte, au moins dans une gamme d'indices foliaires comprise entre 1 et 6-7, et par contre-coup le dessèchement du sol est intense et précoce en saison. Ce dessèchement du sol induit en retour une modification du fonctionnement du couvert, qui augmente sa résistance physiologique à l'évapotranspiration en régulant l'ouverture des stomates. Cette résistance est modulée en fonction des conditions de sécheresse édaphique (dessèchement du sol) et atmosphérique (déficit de saturation de l'air). Par ailleurs, en condition de bonne disponibilité en eau, l'évaporation du sol et la transpiration du sous-bois sont proportionnelles au rayonnement atteignant le sol. Ces flux sont donc inversement proportionnels à l'indice foliaire du couvert. Denmead (1969) repris dans Bréda (1999) montre que l'évaporation du sol représente de l'ordre de 5 % de l'évapotranspiration totale sous un peuplement d'indice foliaire égal à 4. Pour un indice foliaire inférieur à 2, ce même rapport peut atteindre 50 %.

Enfin, le couvert, par sa rugosité de surface (discontinuité, hauteur et hétérogénéité verticale...), intervient sur le régime de turbulences et sur la forme des profils de vent au sein des peuplements. Ces profils verticaux de vent sont théoriquement liés à la distribution verticale de l'indice foliaire et interviennent dans le calcul du bilan d'énergie de l'écosystème (résistance aérodynamique). Ils conditionnent également l'évapotranspiration au niveau du sous-étage et du sol.

1.2. Structure du couvert et bilan d'assimilation

La compréhension et la modélisation des processus physiologiques relatifs au fonctionnement carboné des couverts (photosynthèse, respiration de croissance et d'entretien, répartition et stockage des assimilats) ont historiquement concerné les cultures. Dès 1967, Chartier a mis en évidence l'importance de l'indice foliaire, en tant que descripteur structural du couvert et que paramètre fonctionnel contrôlant à la fois photosynthèse et respiration. Il propose une courbe théorique reliant l'indice foliaire, la respiration et la photosynthèse d'un couvert végétal

(Chartier, 1967, repris par Guyot, 1997). De nombreux travaux, en particulier Gholz (1982), Gholz et *al.* (1990), Waring (1983) ont ensuite permis de montrer que les couverts forestiers présentaient des comportements similaires à ceux des cultures. La productivité primaire nette des peuplements forestiers est positivement corrélée à l'indice foliaire jusqu'à un certain seuil à partir duquel la tendance est inversée (Gholz, 1982, repris dans Bréda, 1999). Ce seuil, parfois appelé indice foliaire optimal correspond, dans un peuplement de Douglas, au demi-indice foliaire maximal (Waring, 1983).

La respiration d'entretien des feuilles d'un couvert correspond à un flux sortant de CO_2 proportionnel à son indice foliaire et dépend de la distribution des masses surfaciques au sein du couvert (ou encore des proportions de feuilles d'ombre et de lumière). La respiration de croissance d'un peuplement est, quant à elle, proportionnelle à la biomasse produite et résulte donc de l'ensemble du fonctionnement du couvert.

L'assimilation nette de CO_2 ou photosynthèse par un couvert forestier dépend de sa structure, de sa surface foliaire verte, de la disponibilité en CO_2 dans l'atmosphère et, plus généralement, du climat. La structure détermine la pénétration et la répartition du rayonnement et elle conditionne la quantité et la qualité de l'énergie reçue par chaque feuille. Rappelons que la disponibilité en rayonnement dans les basses couches du couvert dépend de l'inclinaison des feuilles. Pour le même indice foliaire, le rayonnement pénètre plus ou moins profondément selon l'orientation générale des feuilles. Ainsi pour une architecture de type planophile (prédominance des feuilles horizontales), l'extinction du rayonnement est rapide et seules les strates supérieures du couvert disposent d'un rayonnement suffisant. Au contraire, pour une structure de type érectophile (prédominance des feuilles verticales), l'extinction est moins rapide et les couches inférieures peuvent aussi disposer d'un rayonnement suffisant (Guyot, 1997). L'assimilation de carbone à l'échelle du couvert dépend ensuite de l'indice foliaire et des conditions climatiques. Les travaux récents sur le suivi à long terme des flux d'eau et de carbone, mesurés au-dessus des écosystèmes forestiers européens par la méthode des corrélations turbulentes, confirment cette relation LAI-fixation de carbone et montrent de plus que le bilan net de carbone de l'écosystème dépend pour une large part de sa respiration (Loustau et *al.*, 1999), qui est pilotée par l'humidité et la température de la surface du sol, ainsi que par la biomasse et la matière organique au sol. L'indice foliaire du peuplement intervient donc comme déterminant à la fois du microclimat sous forêt et de l'abondance des retours annuels de litière, comme nous allons le voir au paragraphe suivant.

1.3. Structure du couvert et cycle biogéochimique

Les caractéristiques du couvert interviennent à plusieurs niveaux dans les échanges minéraux et géochimiques au sein des écosystèmes forestiers. En premier lieu, ils déterminent le microclimat hydrique et thermique au niveau du sol. Ainsi, par exemple, la vitesse de minéralisation de la matière organique est une fonction de la température et de l'humidité du sol. Cette température est déterminée par l'énergie disponible au niveau du sol, c'est-à-dire indirectement par l'abondance et la répartition du feuillage. L'humidité des horizons de surface du sol est, quant à elle, inversement proportionnelle à l'interception des

précipitations et des flux énergétiques par le feuillage, et est d'autant plus forte que l'indice foliaire est élevé.

Une entrée importante d'éléments minéraux dans le cycle biogéochimique est le retour de litière, dont la quantité (biomasse) et la qualité (espèce, contenu foliaire) déterminent la part d'éléments restitués. En conditions de fonctionnement normal des peuplements, particulièrement des feuillus, la majeure partie de la biomasse aérienne restituée concerne les feuilles. Il est donc essentiel, pour établir un bilan minéral, de connaître la production annuelle de litière et les caractéristiques chimiques de ses différentes fractions. Selon les conditions du milieu, le type d'humus détermine alors la vitesse de décomposition de cette litière.

Enfin, les apports atmosphériques constituent un autre terme important des restitutions dans l'établissement des bilans minéraux des peuplements, et leurs composantes acides (protons associés à des anions minéraux forts) contribuent à l'acidification des sols (baisse du taux de saturation et du pH du sol). Le terme de dépôt atmosphérique recouvre tous les processus conduisant au dépôt des éléments contenus dans les pluies, les brouillards, la neige, les aérosols, poussières et gaz, sur une surface réceptrice. Dans le cas d'un peuplement forestier, cette surface réceptrice est en majeure partie représentée par l'indice foliaire et, en période défeuillée chez les feuillus, par l'indice de bois (branches). Les pluiolessivats, atteignant le sol sous le couvert, regroupent l'ensemble de ce qui est lessivé directement à travers les trouées, égoutté par le feuillage ou écoulé le long des troncs. On retrouve ainsi le rôle clé de la structure du couvert déjà décrit quantitativement en termes d'interception des précipitations.

1.4. Productivité des écosystèmes forestiers

Dans les écosystèmes feuillus tempérés, le cycle phénologique impose une alternance entre une phase défeuillée pendant laquelle l'indice foliaire est nul et une phase feuillée au cours de laquelle l'indice foliaire évolue. Une première phase de transition correspond au débourrement suivi de l'expansion foliaire qui, le plus souvent en quelques semaines, permet d'atteindre un indice foliaire maximal (fig. 1.1). En fin de saison, la chute des feuilles produit la litière. Ce processus peut durer plusieurs semaines, parfois plusieurs mois, avant le retour au stade défeuillé. Chez les espèces résineuses, cette dynamique intra-annuelle de l'indice foliaire est moins marquée, en raison du renouvellement plus progressif des aiguilles. L'effet saisonnier est toutefois d'autant plus marqué que l'espèce maintient dans son feuillage peu d'années d'aiguilles. Par contre, le polycyclisme peut parfois se traduire par une augmentation de l'indice foliaire, celle-ci restant toutefois difficile à mettre en évidence.

La productivité des couverts forestiers repose sur des processus physiologiques, relatifs au fonctionnement couplé de l'eau et du carbone et modulés par les facteurs du climat et du milieu (alimentation minérale). Les interactions entre structure du couvert et bilans hydrique et carboné ont été rappelées ci-dessus. L'indice foliaire des couverts est un paramètre essentiel de la productivité des forêts : il est d'ailleurs utilisé comme paramètre commun à tous les modèles de croissance et productivité des écosystèmes basés sur les processus fonctionnels

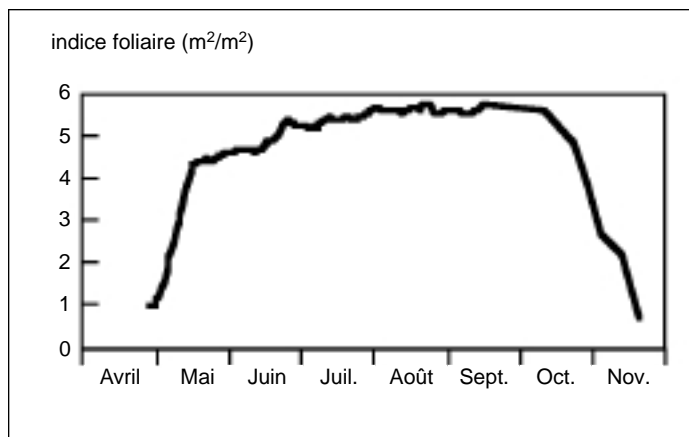


Fig.1.1. Exemple de dynamique saisonnière d'indice foliaire dans un peuplement de 35 ans de chêne sessile du Nord-Est de la France. L'augmentation observée en juin correspond à la mise en place d'une nouvelle pousse (d'après Bréda, 1999).

("physiologically-based process models"), aussi bien à l'échelle globale que stationnelle. Ce type d'approche nécessite de reproduire le cycle saisonnier de l'indice foliaire tel qu'il a été décrit au paragraphe précédent (fig. 1.1). L'approche la plus simple et la plus ancienne, proposée initialement par Monteith (1977) pour les cultures, relie de manière linéaire la production de matière sèche (production primaire) et le rayonnement photosynthétiquement actif absorbé par le couvert, par un coefficient appelé "efficacité de conversion". Pour les forêts, cette efficacité a pu être exprimée en fonction de l'espèce mais aussi de l'indice foliaire. Ce dernier conditionne le rayonnement absorbé par le couvert, selon la loi de Beer-Lambert (Hassika et al., 1997). D'autres modèles, à bases physiologiques plus complètes, ont ensuite été proposés pour les couverts forestiers. Qu'il s'agisse de FOREST-BGC (Running et Coughlan, 1988, Running et Gower, 1991), de BIOMASS (McMurtie et al., 1994), TREGROW (Weinstein et al., 1991), 3-PG (Landsberg et Waring, 1997), tous pilotent l'intensité et distribuent les flux de matière et d'énergie à partir de l'indice foliaire des peuplements. Cet indice est soit mesuré localement depuis le sol soit estimé à partir d'indices de végétation issus de télédétection à l'échelle globale. Les processus écophysiologiques et énergétiques (transpiration, interception des précipitations, photosynthèse, efficacité d'interception et de conversion du rayonnement) sont pour certains proportionnels à l'indice foliaire, pour d'autres présentent un optimum ou un seuil.

De plus, la mise en place de l'indice foliaire d'un couvert feuillu a un coût de construction important. Chaque année, en début de saison, alors que les entrées de carbone dans l'écosystème sont nulles, il faut puiser dans les réserves carbonées des arbres pour mettre en place l'indice foliaire. L'indice foliaire joue donc d'abord un rôle de puits majeur de carbone avant d'être site d'assimilation. Les modèles de productivité, voire de croissance, qui intègrent ces interactions complexes entre ces flux d'eau et de carbone (et d'azote pour certains) et ces relations sources-puits, se révèlent *in fine* très sensibles à ce paramètre. La figure 1.2 illustre la position centrale de l'indice foliaire dans la modélisation couplée des flux d'eau, de carbone et d'azote proposée par FOREST-BGC (pour Bio-Geo-Chemical). Ce sont essentiellement les flux couplés d'eau et de carbone qui sont reproduits à ce pas de temps et les flux hydriques entrant et sortant du système. Au pas de temps annuel, l'indice foliaire intervient essentiellement comme régulateur du

microclimat au niveau du sol et sous forme de retombées, la litière devenant l'interface entre le peuplement et le sol. Les flux de carbone et d'azote calculés à cette échelle sont étroitement dépendants du cycle saisonnier de phénologie et de croissance des différents compartiments de l'écosystème.

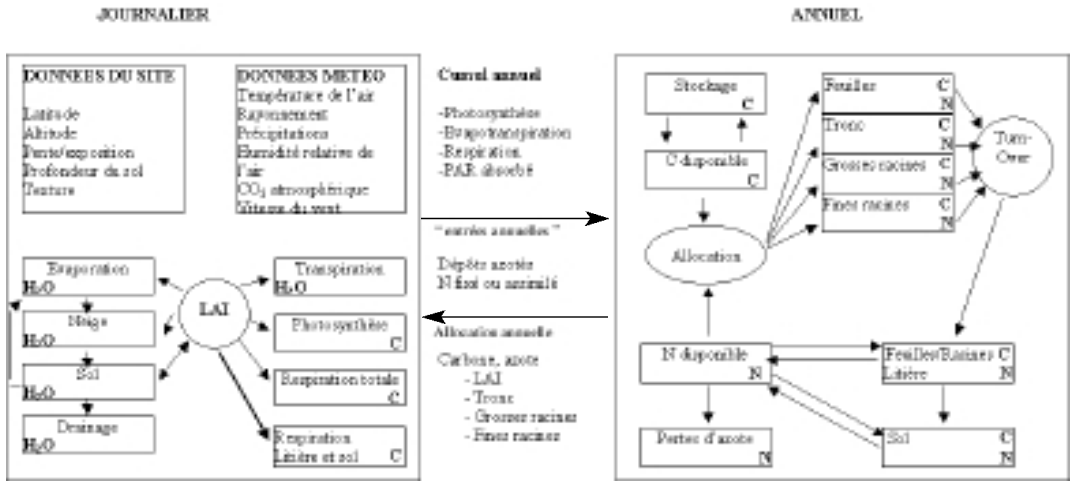


Fig. 1.2. Schéma général du modèle de fonctionnement de l'écosystème Forest-BGC. Le schéma illustre les variables d'état du carbone, de l'eau et de l'azote, les principaux flux de matière et d'énergie au pas de temps journalier et annuel ainsi que les données climatiques journalières nécessaires au calcul. Les variables principales du site sont indiquées.

Au final, on retiendra que les caractéristiques du couvert forestier (indice foliaire, biomasse, fraction de trouées...), en pilotant à la fois le microclimat au sein du couvert et au niveau du sol, en déterminant et régulant les flux d'eau, d'assimilation du carbone et la respiration et enfin en contribuant aux restitutions d'éléments minéraux au sol déterminent une part essentielle de la productivité de l'écosystème. Toute variation de l'état du couvert, par dépérissement, par accident (tempête, gel, défoliation...) ou à travers la gestion (éclaircie, coupe d'ensemencement...), s'accompagne de modifications du fonctionnement du peuplement, dont il est *a priori* difficile de prévoir si le bilan final aura un effet positif ou dépressif sur la croissance.

Ces multiples fonctions assurées par la surface foliaire intéressent non seulement les écophysiologistes mais aussi les écologistes, les sylviculteurs, les aménagistes, soucieux de quantifier l'impact de leurs interventions sur le fonctionnement, la productivité et la durabilité des écosystèmes forestiers. Dans ce contexte, divers descripteurs de la structure des peuplements ont été développés depuis très longtemps et sont couramment utilisés par les praticiens. Une question souvent posée est de savoir dans quelle mesure les descripteurs "traditionnels" permettent de "prédire" l'indice foliaire des couverts. Avant de poser cette question, nous allons rappeler les diverses approches descriptives de la structure des peuplements forestiers.

2. Comment accéder au paramètre indice foliaire ?

De la descriptions de la structure des peuplements et couverts forestiers à la mesure d'indice foliaire

Le couvert forestier peut être défini comme la partie aérienne d'un peuplement située à l'interface entre le sol et l'atmosphère. La notion de peuplement est ici importante, car on ne s'intéresse pas à l'arbre individuellement mais à l'ensemble des arbres d'une unité forestière.

Le couvert regroupe un espace occupé par les houppiers des arbres d'une ou plusieurs espèces, un espace occupé par les troncs et un espace occupé par la strate herbacée. Ces espaces sont superposés (structures régulières de type futaie) ou imbriqués, par taches (mélange par bouquets), ou pied à pied (taillis sous futaie, peuplement jardiné). Il est bien évident que la structure des couverts est étroitement liée à celle des peuplements, qui fait traditionnellement l'objet de diverses approches :

- la phytosociologie décrit la composition en espèces par strates (arborescente, arbustive, herbacée, musicale...), leur recouvrement et leur abondance-dominance ainsi que leur dynamique dans le temps. Cette composition spécifique caractérise un type de communauté, indicatrice des caractéristiques du milieu ;
- l'écologie forestière s'intéresse aux populations et communautés végétales et animales réparties dans chaque compartiment de l'écosystème ;
- la sylviculture et la typologie de peuplements décrivent la structure forestière, dans le but de la contrôler, de l'exploiter, de la pérenniser ;
- enfin, si l'on se préoccupe des flux de matière et d'énergie entre les différents compartiments de l'écosystème, c'est la structure fonctionnelle de l'écosystème qui sera examinée. Le compartiment d'intérêt sera ici essentiellement le compartiment feuillé des houppiers.

Ces approches structurelles sont en outre attachées aux échelles spatiale et temporelle d'observation, qui s'étendent de quelques mètres carrés à une date donnée jusqu'à plusieurs hectares sur la durée d'une rotation forestière. Elles dépendent aussi évidemment de l'objectif de la description (association d'espèces et diversité, gestion et aménagement forestier, processus écophysologiques de la productivité...).

Une des particularités du couvert forestier est de présenter une complexité structurale plus grande que celle des couverts herbacés ou des cultures. Celle-ci se manifeste au niveau de la diversité des éléments qui le constituent (arbres d'âges, de hauteurs ou encore d'espèces différents) et au niveau de leur arrangement dans l'espace (structuration verticale et distribution horizontale).

Dans son approche d'écologie forestière, Otto (1998) distingue les structures verticale et horizontale des forêts, dont les forêts monospécifiques et mélangées illustrent des cas contrastés. Il insiste également sur la dynamique et la multiplicité des structures, qui évoluent dans la durée. La structuration verticale est sans doute l'une des plus utilisées en foresterie et fait appel aux notions

d'étages (dominant et sous-étage), de strates (arborescente, arbustive, herbacée) ou encore de positions dans le couvert (étage dominant, co-dominant, dominé, surcimé). Ces différents descripteurs qualitatifs sont couramment complétés par des données relatives à la diversité spécifique (peuplement monospécifique, mélangé), à l'âge (parcelle équiennne ou inéquiennne), à la distribution des diamètres des arbres (peuplement régulier ou irrégulier). La structuration horizontale est liée à la répartition au sol des espèces, strates et discontinuités : présence de clairières, de trouées, de mélange par bouquets ou pied à pied, etc. De toute évidence, structure horizontale, verticale et composition sont étroitement dépendantes.

Outre ces grandeurs qualitatives, la structure du couvert est appréhendée à partir des grandeurs dendrométriques quantitatives. Ces grandeurs, telles que la hauteur moyenne et la hauteur dominante, la densité, la surface terrière et la distribution des fréquences du diamètre du tronc à 1,3 m du sol, sont employées pour restituer une image abrégée du peuplement. La dynamique temporelle est souvent appréhendée par l'établissement des distributions diamétriques à différents âges du peuplement et par les courbes de croissance. Ces grandeurs servent aussi comme entrées dans de nombreux modèles qui cherchent généralement à prédire la production ligneuse ou à tester des scénarios sylvicoles. La plupart sont empiriques, basés sur des équations d'accroissement des grandeurs dendrométriques (diamètre moyen, densité et surface terrière). D'autres reposent sur des critères de production et de gestion sylvicole, à l'exemple de "Simule", utilisé pour tester des scénarios d'éclaircie (Dhôte, 1995), de CAPSIS (Croissance d'Arbres en Peuplement et Simulation d'Interventions Sylvicoles) (Dreyfus et Bonnet, 1995), ou de SYLOPT (SYLviculture OPTimale) (Guo et Peyron, 1995). Des modèles plus récents, dits architecturaux, considèrent la totalité des organes de l'arbre, simulent son développement et sa croissance en se référant aux connaissances botaniques de son architecture. Tel est le cas d'AMAP (Atelier de Modélisation de l'Architecture des Plantes du CIRAD) pour lequel de nouveaux descripteurs morphologiques ont été introduits. Toutes les composantes de l'arbre sont considérées et géométriquement représentées. Ces modèles se basent sur le concept d'unité architecturale, qui caractérise l'architecture élémentaire des arbres d'une même espèce. Cette unité architecturale est observée chez l'arbre jeune et constitue le support autour duquel s'effectue les processus de ramification et de hiérarchisation des différents organes et la formation de la cime (Barthélémy et *al.*, 1995). Les arbres peuvent aussi être représentés par des formes simples (cône, ellipsoïde, sphère...) : tel est le cas du modèle 5-Scales de Chen et Leblanc (2000). Pour ces modèles architecturaux, le passage de l'arbre au peuplement s'effectue par duplication. Les relations de voisinage sont prises en compte par des indices de répulsion et de distribution spatiale statistique de tiges.

Dans l'approche des phytoécologistes, la végétation est perçue comme une mosaïque de populations chevauchantes (tant horizontalement que verticalement) de différentes espèces (Whittaker, 1967 in Walter, 1994). Plusieurs variables structurales quantitatives telles que la fréquence relative et le recouvrement ont été introduites et appliquées aux peuplements forestiers. La structure spatiale et les relations de voisinage sont aussi appréhendées à l'aide d'indices de dispersion, d'agrégation, de compétition, etc. Des statistiques telles que l'analyse spectrale de Fourier et d'auto-corrélation ont été utilisées pour appréhender la dynamique

temporelle et spatiale de la structure des peuplements. Ces méthodes sont généralement associées à une cartographie des couronnes des arbres, du sol et des essences dans le peuplement.

La structure du couvert est déterminée par la structure individuelle de ses différentes composantes, leur densité et leur distribution spatiale. Notons aussi que les interactions entre ces composantes et le milieu sont à l'origine de modifications structurales : c'est la dynamique du couvert au cours du temps qui lui confère des propriétés nouvelles. Norman et Campbell (1989), tout en signalant la difficulté de définir la structure de la canopée, la considèrent comme étant *l'organisation spatiale des différents organes de la végétation*, c'est-à-dire la distribution des positions, orientations et formes de ces différents organes. A cette vision statique, Welles (1990) ajoute une dimension temporelle et note que la structure du couvert est dynamique à des échelles de temps variables : héliotropisme des feuilles, cycle phénologique saisonnier, réponse de la végétation aux conditions hydriques et de rayonnement, attaques parasitaires, gestion, mortalité, etc.

Afin de mieux tenir compte des influences de la structure sur les interactions entre la plante et son environnement, une vision plus biophysique de la végétation a été développée. La modélisation mécaniste de certains flux complexes de matière et d'énergie (photosynthèse, évapotranspiration, production primaire), d'interactions et d'adaptation entre le peuplement et son environnement a été abordée à partir de nouveaux descripteurs structuraux. Ces descripteurs se rapportent au volume végétal du couvert, et quantifient essentiellement les surfaces d'échanges entre la plante et son environnement. Le couvert est regardé comme un volume. Définir sa structure revient, comme le signale Welles (1990), à répondre aux questions suivantes : **Quels sont les éléments du couvert (feuilles, tiges, branches ou fruits) ? Combien sont-ils ? Où sont-ils ? Comment sont-ils orientés ? Quelles sont leurs dimensions ?**

Dans la réponse à la première question, le plus grand intérêt est accordé au feuillage pour des raisons que Ross (1981) a bien identifiées, en accordant trois fonctions principales au feuillage :

1. Le feuillage comme récepteur de radiation : 80 à 90 % de la radiation solaire absorbée par le couvert l'est par les feuilles, le reste est absorbé par les autres organes. Considérées comme récepteur de radiation, les caractéristiques pertinentes sont la position, l'orientation, la forme et les dimensions des feuilles, ainsi que leurs propriétés optiques.
2. Le feuillage comme organe de photosynthèse : l'essentiel de la photosynthèse d'un couvert forestier est assuré par les feuilles. Les autres organes verts (tels que les rameaux annuels ou les branches, parfois aussi les troncs) contribuent dans une moindre mesure à la photosynthèse totale. Pour définir un organe photosynthétique, les caractéristiques pertinentes sont la surface, l'anatomie, la morphologie et la physiologie des éléments foliaires.
3. Le feuillage en tant qu'organe de croissance et de développement des arbres : les caractéristiques pertinentes pour en évaluer les coûts de construction et d'entretien sont le nombre de feuilles et leur taille, l'âge et le taux de matière sèche.

Ces éléments fonctionnels et structuraux du couvert, qui viennent d'être rapidement évoqués, sont suffisants pour convaincre le praticien de l'intérêt de déterminer l'indice foliaire de ses parcelles. Une des premières idées, en dehors d'entreprendre une mesure spécifique, est de chercher à "prédire" l'indice foliaire des parcelles à partir de leurs descripteurs traditionnels de phytosociologie (taux de recouvrement des différentes strates, composition en espèces...), de dendrométrie (surface terrière, densité, âge...), de surveillance sanitaire (pertes foliaires) ou de typologie des peuplements (futaie, taillis sous futaie, plantation...). Malheureusement, il n'existe pas, même pour les peuplements gérés, de relation générale, simple et robuste permettant de prédire l'indice foliaire d'un couvert sur de telles bases.

Nous allons illustrer ce propos à partir d'une synthèse de la littérature, regroupant 338 valeurs d'indice foliaire forestier, couvrant une gamme aussi large que possible d'espèces, de types de peuplements, d'âges, de densités et de conditions stationnelles. L'ensemble des références utilisées dans cette synthèse est donné en annexe.

Tout d'abord, l'analyse brute des données synthétisées regroupe des sites géographiquement très dispersés. En premier examen, nous ne remarquons qu'aucune tendance ne peut être dégagée entre la position latitudinale ou longitudinale des parcelles et leur valeur d'indice foliaire. Cette analyse globale, toujours multi-sites et multi-espèces, montre ensuite que le type d'espèce composant le peuplement détermine l'ordre de grandeur de l'indice foliaire. Ainsi, la **figure 1.3**, toujours issue de la synthèse de la littérature, illustre un classement des indices foliaires moyens par groupes d'espèces : les pins présentent des indices de l'ordre de 3, les feuillus décidus de l'ordre de 5, et les autres résineux (sapin, épicéa, douglas) de l'ordre de 6.

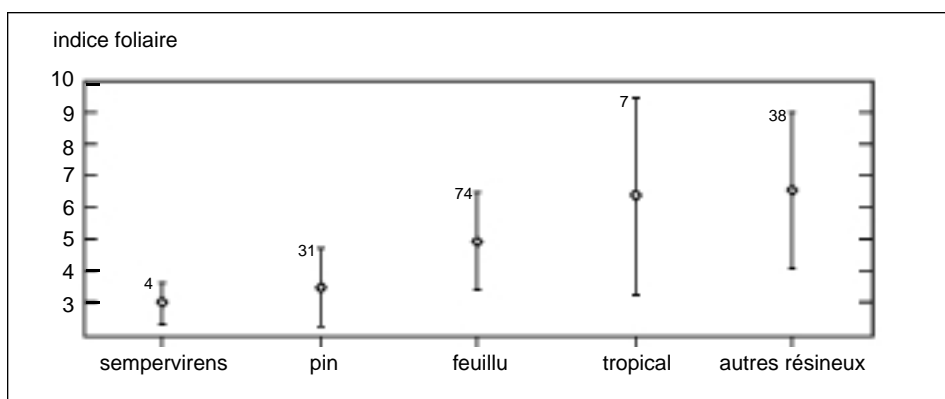


Fig.1.3. Indices foliaires moyens calculés à partir d'une synthèse de littérature de 154 parcelles selon les grands types d'essence. Les effectifs de parcelles sont indiqués à côté de l'écart-type (barres verticales). Seules des valeurs d'indice foliaire déterminées par méthode directe (litières ou relations allométriques) ont été conservées pour cette représentation.

Les caractéristiques dendrométriques des parcelles sont en revanche peu corrélées avec l'indice foliaire, qu'il s'agisse de peuplements feuillus ou résineux. Les corrélations entre indice foliaire et variables dendrométriques classiques de densité,

surface terrière, diamètre moyen et âge sont indiquées dans le **tableau 1.1**. L'indice foliaire tend à augmenter avec la surface terrière (corrélation de + 0,4). Pour le reste, les corrélations sont faibles et ne permettent pas d'envisager une approche prédictive.

Tab. 1.1. Coefficient de corrélation entre variables dendrométriques et indice foliaire. Les autres résineux regroupent épicéas, sapins, douglas. L'effectif des peuplements pris en compte pour le calcul de corrélation est indiqué entre parenthèses.

	Age	Densité	Surface terrière	Diamètre moyen
Feuillus décidus	-0,23 (n=135)	0,20 (n=126)	0,40 (n=127)	-0,45 (n=64)
Pins	-0,22 (n=55)	-0,02 (n=72)	0,41 (n=59)	-0,04 (n=20)
Autres résineux*	-0,22 (n=52)	0,30 (n=58)	0,57 (n=54)	-0,09 (n=11)

Une forte dispersion se cache derrière ces coefficients et celle-ci est constatée pour chaque groupe d'espèces. Pour les feuillus (*fig. 1.4*), l'indice foliaire tend à diminuer lorsque le diamètre moyen des arbres du peuplement augmente. La corrélation est positive avec la surface terrière, mais la dispersion est forte.

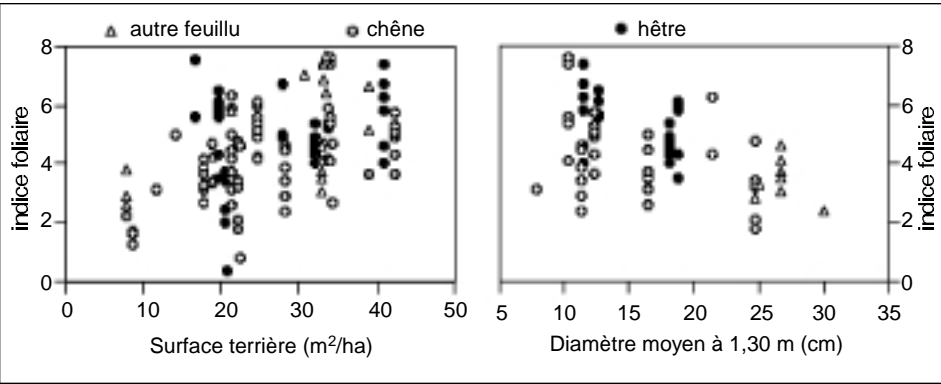


Fig. 1.4. Relations entre indice foliaire et variables dendrométriques, dans le cas de peuplements feuillus caduques, établies à partir de données de la littérature.

Les chênaies et les hêtraies sont les deux structures les plus représentées dans le groupe de feuillus caduques de notre échantillon, et les coefficients de corrélation entre indice foliaire et variables dendrométriques pour chacune d'elles sont donnés dans le **tableau 1.2**. Certains coefficients augmentent, en particulier pour les hêtraies souvent gérées en structure régulière et plus pure que les chênaies, mais le pouvoir prédictif de ces variables reste limité. Le Dantec *et al.* (2000) présentent un autre exemple de relation entre indice foliaire et densité dans les chênaies et hêtraies de la forêt de Fontainebleau.

Tab.1.2. Coefficient de corrélation entre variables dendrométriques et indice foliaire dans le cas de chênaies ou de hêtraies. L'effectif de peuplements pris en compte pour le calcul de corrélation est indiqué entre parenthèses.

	Age	Densité	Surface terrière	Diamètre moyen
Chênaies	-0,22 (n=70)	+0,39 (n=68)	+0,42 (n=69)	-0,36 (n=33)
Hêtraies	-0,51 (n=41)	+0,37 (n=34)	+0,20 (n=37)	-0,51 (n=22)

Dans le cas des pins (*fig. 1.5*, corrélations *tab. 1.1*), l'indice foliaire des parcelles semble augmenter avec leur surface terrière. Là encore, la dispersion autour de la tendance est forte. En revanche, aucune tendance ne peut être dégagée entre l'indice foliaire des pinèdes et leur âge,leur densité ou leur diamètre moyen. Pour ce groupe, la gamme de conditions stationnelles est très étendue, et des différences de fertilité peuvent induire des différences d'indices foliaires du simple au double, à un âge ou une surface terrière donnés. Ceci est d'autant plus ennuyeux pour les pins que les indices foliaires varient dans une gamme de valeurs faibles (<5) dans laquelle les fonctions écophysiologiques sont directement proportionnelles à l'indice : prédire un indice de 4 au lieu de 2 conduira, par exemple, à surestimer la conductance du couvert de 50 % (Granier *et al.*,2000).

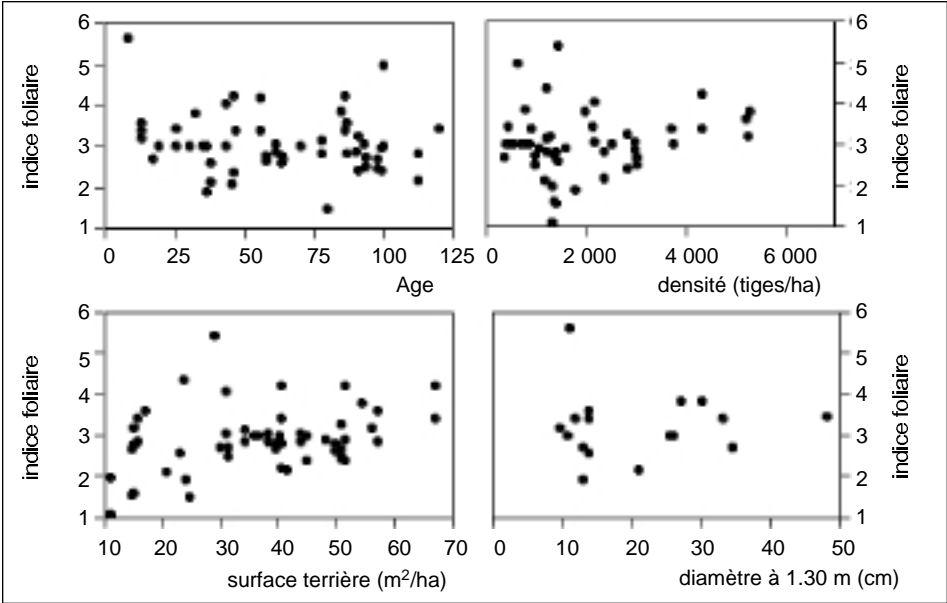


Fig. 1.5. Relations entre indice foliaire et variables dendrométriques, dans le cas de peuplements de pins, établies à partir de données de la littérature.

Pour les autres résineux (épicéas, sapins, douglas) (*fig. 1.6*), l'indice foliaire augmente avec la densité ou la surface terrière. L'indice foliaire n'augmente plus au-delà d'un seuil de 50 m²/ha. L'indice foliaire apparaît, ici encore, très variable en fonction de l'âge : une étude de parcelles de 90 ans a d'ailleurs suffi à cerner cette variabilité. Ici aussi, des effets de fertilité apparaissent, en particulier dans la relation avec la surface terrière ou avec la densité. Plusieurs travaux ont spécifiquement étudié cet aspect, nous y reviendrons plus loin.

Tab.1.3. Coefficient de corrélation entre variables dendrométriques et indice foliaire dans le cas de peuplements d'épicéas ou de douglas. L'effectif de peuplements pris en compte pour le calcul de corrélation est indiqué entre parenthèses.

	Age	Densité	Surface terrière	Diamètre moyen
Pessières	-0,07 (n=36)	+0,37 (n=38)	+0,68 (n=34)	-0,14 (n=8)
Douglasaies	-0,59 (n=14)	-0,12 (n=17)	+0,84 (n=16)	

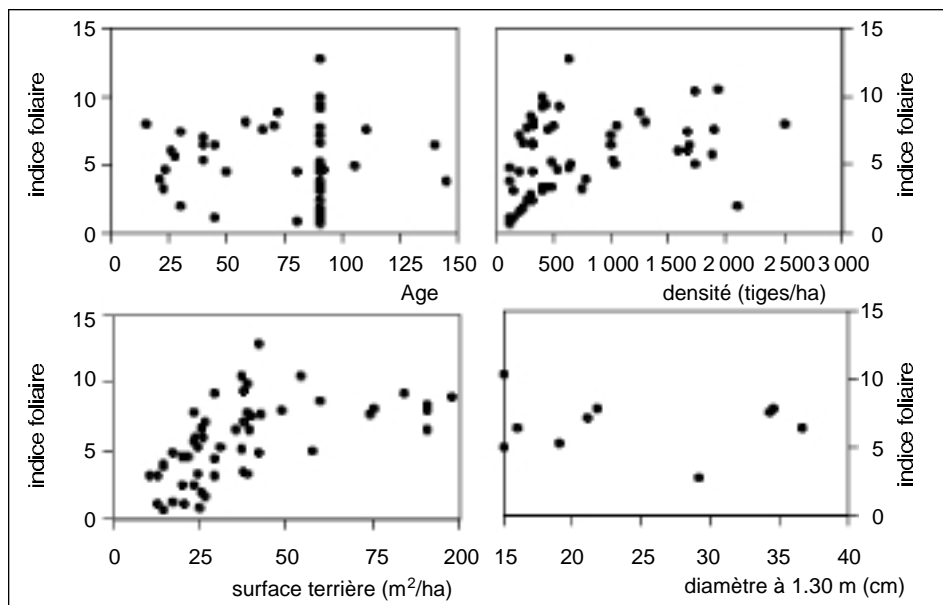


Fig.1.6. Relations entre indice foliaire et variables dendrométriques dans le cas des sapins, épicéas, douglas, établies à partir de données de la littérature.

Les taux de recouvrements des strates arborescente et arbustive, tels qu'ils sont appréciés visuellement en classes par les phytosociologues², paraissent peu corrélés avec l'indice foliaire des parcelles. La figure 1.7 illustre un exemple dans des parcelles de chênaies.

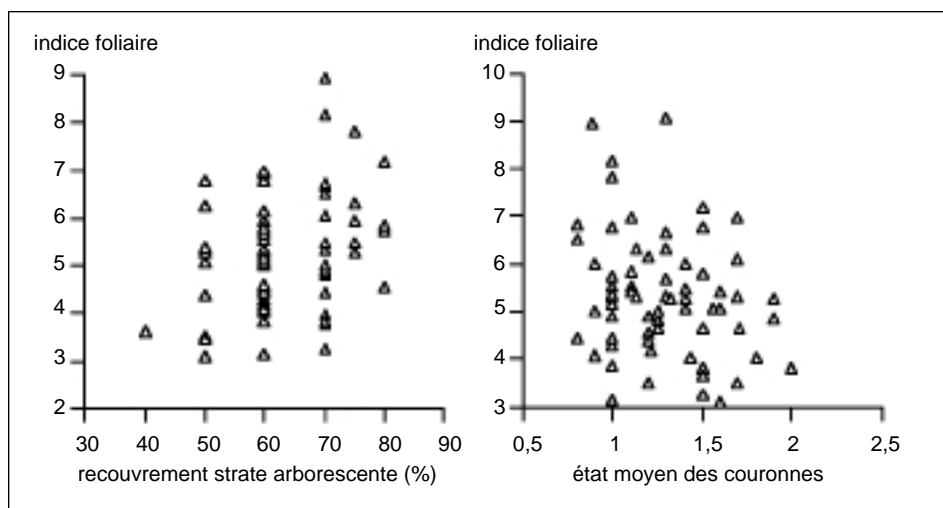


Fig.1.7. Relation entre taux de recouvrement de la strate arborescente et l'indice foliaire total de la placette (données N.Bréda).

Fig.1.8. Relation entre la note moyenne de l'état sanitaire observé visuellement sur 10 arbres et l'indice foliaire de la placette (données N.Bréda).

² La notation du recouvrement en phytosociologie est une appréciation visuelle par classe de 5 ou 10 % de fermeture du couvert, réalisée indépendamment pour chacune des strates arborescente, arbustive, herbacée et muscinale.

Enfin, l'appréciation visuelle de l'état des cimes des arbres dominants et co-dominants d'une placette³, indicateur largement utilisé dans le cadre du réseau européen de surveillance de l'état sanitaire des forêts, n'est pas non plus étroitement corrélé à son indice foliaire. La **figure 1.8** illustre le cas des placettes de chênaies de l'observatoire écologique de la Harth, mis en place pour suivre le dépérissement des chênes sur le massif. On note seulement que la tendance est cohérente, avec une note sanitaire satisfaisante (1 ou moins) pour les forts indices foliaires, alors que les indices foliaires tendent à baisser avec le mauvais état des couronnes (note élevée).

Ces quelques illustrations montrent que les caractéristiques d'âge, de densité, de surface terrière, de structuration en strates ou encore d'état sanitaire contribuent toutes pour une petite part à la variabilité des indices foliaires, mais qu'elles ne permettent pas de prédire sa valeur. Même les approches multifactorielles ne conduisent pas à des relations prédictives satisfaisantes. Ceci peut s'expliquer parce que les variables dendrométriques utilisées intègrent toute la durée de vie du peuplement, tandis que l'indice foliaire est un paramètre dynamique, qui dépend de la date (de l'année, de la saison...). L'hétérogénéité des conditions stationnelles (effets de fertilité, de climat...) et la gestion, qui introduit des phases de déséquilibre entre indice foliaire et potentialité du site pour une espèce donnée sont aussi des sources de variabilité importante dans les relations dendrométrie - indice foliaire. Nous reviendrons sur ce point, à propos de l'établissement de relations allométriques visant à prédire l'indice foliaire d'une parcelle pour une année donnée.

Pour faire face à ces difficultés de prédiction précise de l'indice foliaire d'un couvert, à partir de ses caractéristiques phytosociologiques, dendrométriques ou sylvicoles, l'indice foliaire devra donc le plus souvent être mesuré, de manière directe ou indirecte, avec des techniques, des théories, des échantillonnages plus ou moins complexes : c'est ce qui a motivé cette synthèse métrologique.

³ La notation de l'état des cimes a ici été réalisée visuellement selon le protocole DEPEFEU utilisé par le Département Santé des Forêts (Nageleisen, 1993). L'architecture du houppier (longueur et disposition des rameaux) et la disposition des feuilles y sont prises en compte. Le protocole préconisé pour les notations dans le cadre du réseau européen repose sur la notion de pertes foliaires par rapport à un arbre de référence. La notation s'effectue par classe de 5 ou 10 %. Dans les deux protocoles, plus la note est élevée, plus l'état de l'arbre est dégradé.

Chapitre 2

Bases méthodologiques

1. Introduction

Pour un “ensemble végétal” particulier (arbre, plante, culture...), la structure du feuillage peut être caractérisée par de nombreux descripteurs tels que le nombre de feuilles, leurs surfaces, leurs formes, leurs positions respectives dans l'espace. En outre, elle doit être considérée dans ses rapports aux sources lumineuses et à des directions d'observations particulières (par en dessus, par en dessous, en oblique, à la verticale...). L'expérience et les besoins ont conduit les ingénieurs et les chercheurs à réduire ces données à quelques paramètres ou indices “synthétiques” qui sont utilisés pour caractériser “l'ensemble végétal”, son évolution et son fonctionnement.

Au-delà de la pertinence de leur définition, ces paramètres posent généralement de gros problèmes d'estimation et d'interprétation. En forêt, ces difficultés sont augmentées par l'inaccessibilité d'une large part de la composante foliaire. Nous allons, dans cette partie, tenter de préciser certaines des notions les plus usuellement utilisées et cela dans le but d'éclairer les métrologies et les modèles développés et utilisés par les gens de l'art.

Tout au long des différentes approches explorées, certaines hypothèses ou références seront le plus souvent tenues pour implicites. Ainsi, les feuilles sont-elles assimilées à des surfaces planes et les troncs, les branches, les brindilles, les fruits ou les fleurs, qui composent le couvert, sont, dans la plupart des cas, ignorés ou traités séparément. En outre, on suppose que les surfaces foliaires sont “petites” par rapport à l'espace considéré, toutes de même valeur et que les feuilles sont “nombreuses”. Les faisceaux, flux, sondes ou rayons auxquels on se réfère sont assimilables à des jets lumineux, plus ou moins larges, ou à des directions qui suivent des trajectoires rectilignes.

2. Organisation du feuillage

2.1. L'indice de surface foliaire

Définition. On appelle “indice de surface foliaire” associé au volume V (en anglais LAI ou leaf area index) la surface de l'ensemble des feuilles contenues dans V rapportée à la surface projetée, verticalement, de V sur le sol, ce dernier étant lui-même assimilé à un plan horizontal. La surface des feuilles est mesurée sur une seule face pour tous les feuillus ainsi que pour les résineux n'ayant des stomates que sur un seul côté de leurs aiguilles (ex. : le sapin pectiné). Dans le cas contraire (ex. : l'épicéa commun), la surface totale de la feuille est prise en compte (on parle parfois d'indice des aiguilles – en anglais : NAI, needle area index).

Cette définition (Pardé J. et Bouchon J., 1988) correspond à l'usage le plus courant. Cependant, dans certains ouvrages ou articles, on a tendance, pour faciliter l'exposé, à généraliser en considérant la projection du volume sur un plan

perpendiculaire à une direction \vec{D} quelconque. Une direction qui n'est pas toujours la verticale du sol. En toute rigueur, on devrait parler de l'indice foliaire du volume V vis-à-vis d'un plan de normale \vec{D} . On verra plus loin que, si l'on fait l'hypothèse d'une distribution aléatoire des feuilles dans l'espace, cette précision est en grande partie superflue.

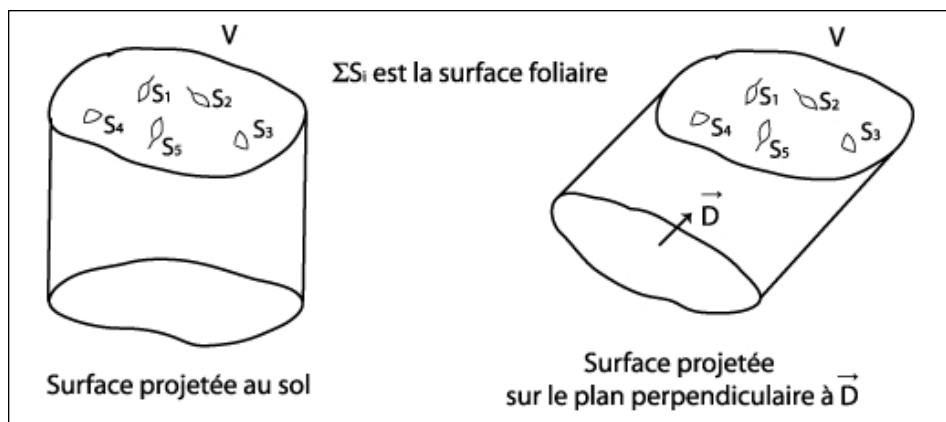


Fig. 2.1. Principes graphiques de la définition de l'indice foliaire.

Cet indice est directement associé aux capacités d'échange entre les végétaux et l'atmosphère. Il représente une donnée capitale pour caractériser certains processus tels que la photosynthèse, la respiration, l'interception des précipitations, etc. Il est l'une des entrées principales de la plupart des modèles traitant du fonctionnement des écosystèmes. Son estimation a donné lieu au développement de nombreuses méthodes d'évaluation classées dans les catégories directes, indirectes ou semi-indirectes, selon l'approche privilégiée par l'opérateur.

Pour tenir compte des autres composantes du couvert (troncs, branches, etc.), certains auteurs introduisent d'autres indices tels que le VAI (vegetation area index) ou le PAI (plant area index). Nous n'aborderons pas, sauf de manière marginale, ces démarches complémentaires.

Définition. Si l'on considère que l'espace est appréhendé par l'intermédiaire d'un repère cartésien (O, x, y, z) , l'axe Oz étant associé à la verticale du lieu considéré, et si l'on note

$$S(x, y, z, dx, dy, dz),$$

la surface foliaire interceptée par le volume parallélépipédique construit autour du point (x, y, z) et de côtés (dx, dy, dz) , on peut définir la fonction $u(x, y, z)$, dite fonction de densité foliaire, comme la limite lorsque le volume du parallélépipède, de côtés (dx, dy, dz) , tend vers zéro du rapport :

$$\frac{S(x, y, z, dx, dy, dz)}{dx dy dz}$$

Pour tout volume V , la surface foliaire contenue dans V , soit $S(V)$, s'écrit :

$$S(V) = \int_V u(x,y,z) dx dy dz$$

En retour on parlera, avec des supputations plus ou moins explicites sur l'homogénéité du milieu, de densité moyenne dans le volume V , $S(V)/V$.

Remarque : l'indice foliaire est un rapport de surfaces et n'a pas de dimensions, au contraire $u(x,y,z)$, ainsi que $S(V)/V$, sont de dimension m^{-1} (m^2/m^3).

En pratique, on se réfère fréquemment à une surface A (surface simple : cercle, carré, etc.) au sol et au volume $V(A)$ contenu dans l'enveloppe définie par A et les génératrices parallèles à Oz qui s'appuient sur le contour de A et qui sont limitées par le sol et le sommet du couvert végétal. On calcule l'indice foliaire associé à cette surface :

$$LAI = \frac{S(V(A))}{A}$$

et c'est cette valeur, sans dimension, ou tout du moins sa moyenne, qui est le plus souvent utilisée pour décrire le couvert des peuplements forestiers en un endroit donné du sol.

Si, dans un peuplement donné, on effectue plusieurs mesures correspondant aux surfaces A_1, A_2, \dots, A_n , on peut calculer la valeur du LAI moyen sous la forme

$$\frac{\sum_i S(V(A_i))}{\sum_i A_i}$$

ou procéder à des ajustements par les méthodes des régressions spatiales (en particulier en utilisant les approches géostatistiques) et obtenir une cartographie lissée de l'indice foliaire. Bien évidemment, les règles générales de l'échantillonnage statistique sont à prendre en compte.

On peut aussi découper, par des plans orthogonaux à Oz , le volume $V(A)$ en "tranches" d'épaisseurs z et étudier l'évolution de l'indice selon un gradient vertical. Cette approche conduit naturellement à associer à cette exploration du couvert une fonction $L(z)$:

$$L(z) = \frac{S(z)}{A}$$

avec $S(z)$ la surface foliaire comprise entre le sommet H du couvert et la cote z . On a :

$$L(0) = LAI \text{ et } L(H) = 0$$

Cette façon d'associer à la cote verticale z une calibration $L(z)$ est souvent reprise lors de la modélisation de l'intersection de la lumière par le couvert. Elle conduit à opérer une sorte de saut analogique entre le couvert végétal et un milieu dont l'opacité varie, du haut vers le bas, selon un gradient $L(z)$. On utilise aussi la dérivée de $L(z)$. C'est d'ailleurs cette dernière fonction que l'on approche lorsque l'on

mesure l'indice foliaire le long des tranches horizontales du couvert. Ce gradient est alors mis, plus ou moins explicitement, en relation avec une fonction $I(z)$ qui traduit l'évolution verticale de l'intensité lumineuse pénétrant le milieu.

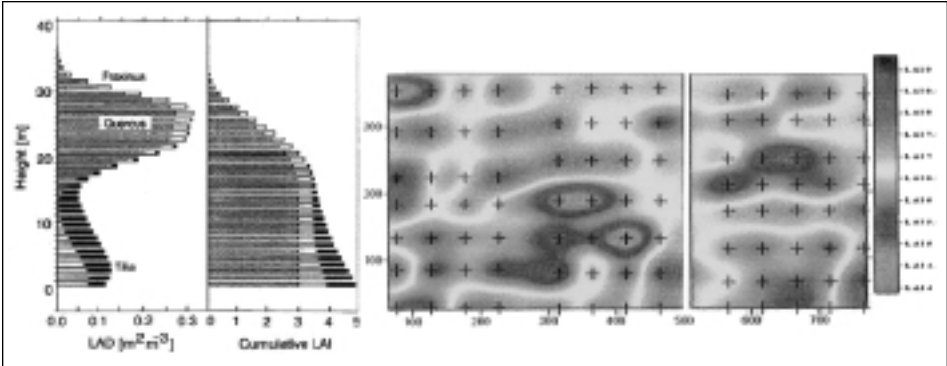


Fig. 2.2. Surface foliaire, $L(z)$ et $L(z + dz) - L(z)$, dans des peuplements de chênes, de frênes et de tilleuls (Eeemak, 1998) et répartition spatiale (horizontale) du LAI en forêt de Hesse (Bréda N., 2001).

2.2. Répartition spatiale des feuilles

Les modèles de répartition et de dispersion du feuillage traduisent l'agencement des feuilles dans l'espace. Classiquement, les statistiques spatiales se réfèrent à trois modèles de dispersion : aléatoire, régulier et agrégatif. Ces modèles peuvent se combiner et on retiendra que la nature des distributions observées est dépendante de l'échelle spatiale considérée.

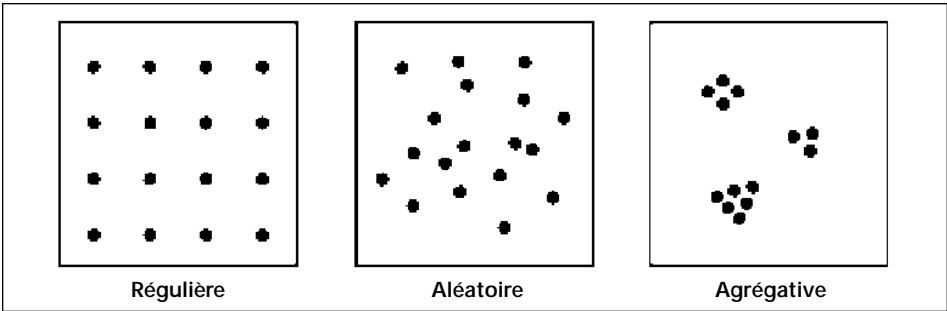


Fig. 2.3. Exemples des trois répartitions de bases dans R^2 .

• Dispersion aléatoire

Considérons un cube C , construit sur un repère (O,x,y,z) et de côté unitaire. Si l'on veut simuler une distribution aléatoire de N feuilles dans C , il suffit de répéter N fois l'opération suivante : sur chacun des trois côtés du cube s'appuyant sur chaque axe du repère, on choisit au hasard une valeur comprise entre 0 et 1 (distribution uniforme) et l'on positionne la feuille sur le point ayant ces trois valeurs pour coordonnées.

• Dispersion régulière

Un exemple de dispersion régulière : soit un dispositif obtenu en dupliquant une feuille initiale f_0 par des translations de vecteurs V_1, V_2, V_3 formant un véritable trièdre :

$$f_{01} = (f_0 + V_1) \quad f_{02} = (f_0 + V_2) \quad f_{03} = (f_0 + V_3)$$

$$f_{11} = (f_0 + 2V_1) \quad f_{12} = (f_0 + 3V_2)$$

Cette opération assure un maillage régulier de l'espace. Bien évidemment, dans la nature, une telle régularité est peu probable. On peut donc accompagner la construction de la grille d'un bruit aléatoire v pour peu qu'il soit de faible amplitude par rapport aux vecteurs V :

$$f_0 + kV_i + v \quad v \ll V_i$$

avec la distribution directionnelle de v uniforme et la distribution de v normale. On observe de telles distributions lorsque l'on est en présence de familles de prédateurs qui se répartissent de manière égalitaire des "territoires" de chasse, ou face à des éléments qui cherchent à occuper l'espace avec un minimum de dépense énergétique.

• Dispersion agrégative

Des exemples de distributions agrégatives se construisent en prenant appui sur les deux modèles précédents mais en associant à chaque point du processus spatial initial (on parle de foyers ou de centres mères) non pas une feuille mais une grappe, ou un agrégat de N feuilles voisines. N peut être aléatoire. *A priori*, on peut penser que l'architecture générale des arbres (un tronc, des branches, des brindilles) conduit à une occupation de l'espace par agrégats.

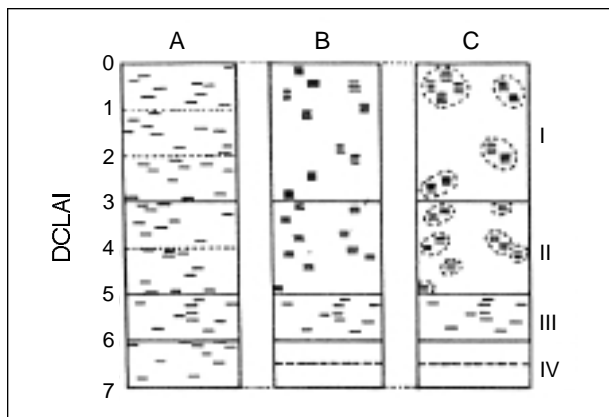


Fig. 2.4. Dispersion spatiale (verticale) du feuillage (d'après Sinoquet H. et Andrieu B., 1993). Le *DCLAI* est l'indice $L(z)$.

On représente trois scénarios. A, dispersion aléatoire dans les quatre niveaux I, II, III, et IV ; B et C, dispersion agrégative dans les niveaux I et II ; aléatoire en III et régulière en IV.

2.3. La position angulaire des feuilles

Dans l'étude des rapports entre le couvert et la lumière, l'indice foliaire, d'une part, qui s'attache à mesurer l'abondance du feuillage, et les modèles du répartition spatiale des feuilles, d'autre part, qui traitent de l'occupation de l'espace, ne fournissent qu'une description partielle des conditions d'interférence entre les

feuilles et la lumière. Pour être complet, on doit tenir compte de l'orientation des feuilles. En effet, ce caractère détermine, pour une grande partie, la capacité des feuilles à intercepter le rayonnement solaire issu d'une direction de vecteur unitaire D .

En se référant à un repère cartésien (O, x, y, z) pour lequel Oz symbolise la verticale, deux données angulaires, attachées à la normale au plan foliaire, de vecteur unitaire \vec{n} , permettent de positionner l'orientation d'une feuille. Il s'agit de l'inclinaison, α , et de l'angle azimutal, φ .

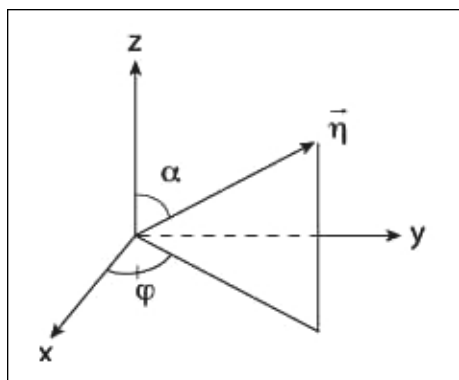


Fig. 2.5. Représentation des angles (l'inclinaison, α , et l'angle azimutal, φ) qui caractérisent la normale \vec{n} à la feuille.

Pour avoir une idée de la manière dont les orientations sont distribuées, il suffit de considérer une partition de α et φ en respectivement p et q classes :

$$0 < \alpha_1 < \alpha_2 < \dots < \alpha_{i-1} < \alpha_i < \dots < \alpha_p = 2\pi$$

$$0 < \varphi_1 < \varphi_2 < \dots < \varphi_{j-1} < \varphi_j < \dots < \varphi_q = 2\pi$$

et de compter sur un échantillon de taille N le nombre n_{ij} de feuilles qui appartiennent à chaque classe produit $[\alpha_{i-1}, \alpha_i] \times [\varphi_{j-1}, \varphi_j]$. Les termes :

$$p_{ij} = \frac{n_{ij}}{N} \quad p_{ij} = 1$$

$$p_{i\bullet} = \frac{n_{i0}}{N} \quad p_{\bullet j} = \frac{n_{0j}}{N} \quad \text{avec} \quad n_{i0} = \sum_j n_{ij} \quad n_{0j} = \sum_i n_{ij}$$

caractérisent les fréquences de répartition des coordonnées angulaires de \vec{n} .

Il est important de se poser la question de l'indépendance entre les deux descripteurs que sont l'inclinaison et l'angle azimutal :

$$\text{Indépendance : } n_{ij} = \frac{n_{i0} n_{0j}}{N} \quad p_{ij} = p_{i\bullet} \cdot p_{\bullet j}$$

Si l'on s'intéresse à un nombre de feuilles suffisamment important, en théorie un nombre infini, on peut envisager de généraliser l'approche précédente en substituant aux p_{ij} une fonction de distribution $g(\alpha, \phi)$. Cette fonction est la densité de distribution conjointe des deux variables aléatoires A et F qui prennent pour valeurs les coordonnées angulaires α et ϕ d'une feuille prise au hasard dans le couvert, on a :

$$\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} g(\alpha, \phi) d\alpha d\phi = 1 \quad \text{et} \quad \bar{\alpha} = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} \alpha g(\alpha, \phi) d\alpha d\phi$$

$\bar{\alpha}$ = l'inclinaison moyenne

A priori, il n'y a pas de raison de supposer que les deux variables aléatoires A et F associées à l'inclinaison et l'azimut sont indépendantes. D'ailleurs, quelques études attentives et un peu d'observation montrent qu'en général il n'en est rien (Kimes et Kirchmer, 1983). Cependant, cette supposition est fréquente et cela essentiellement en raison des facilités de calcul et d'observation qui lui sont attachées.

Indépendance entre l'inclinaison et l'azimut $g(\alpha, \phi) = g_1(\alpha)g_2(\phi)$

où $g_1(\alpha)$ et $g_2(\phi)$ (extensions de $p_{i.}$ et $p_{.j}$) désignent les distributions marginales de α et ϕ .

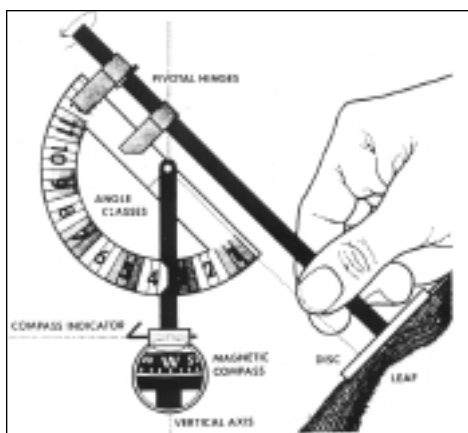
2.3.1. Distribution azimutale

La répartition azimutale est couramment modélisée par la distribution uniforme, ce qui revient à considérer qu'il n'y a pas de plan vertical jouant un rôle particulier. Dans de telles conditions :

- pour un arbre, le tronc est vu comme un axe de symétrie ;
- pour un peuplement planté, on néglige l'asymétrie introduite par les lignes de plantation, on évite de se positionner à proximité des bordures... Pour un peuplement issu de régénération naturelle, on néglige l'interférence du feuillage avec les trajectoires locales du soleil...

Bien évidemment, dans la plupart des cas, cette hypothèse n'est pas recevable sans justifications complémentaires ; toutefois, elle est communément adoptée et se traduit par :

Distribution uniforme : $g_2(\phi) = 1/2\pi$



2.3.2. Distribution des inclinaisons

La distribution des angles d'inclinaison foliaire a fait l'objet de plusieurs études (Warren Wilson J., 1959 ; De Witt C.T., 1965 ; Ross J., 1981). De nombreuses propositions ont été avancées pour traduire les tendances observées dans les milieux les plus fréquents et relativement aux espèces les plus communes.

Fig. 2.6. Mesures des angles d'inclinaison et d'azimut au moyen du «compass-contactor» : le compas rapporteur (Norman J.M. et Campbell G.S., 1989).

Distribution	Feuilles en majorité	$g(\theta)$	$\bar{\alpha}$
planophile	horizontales	$2(1 + \cos(2\theta))/\pi$	27°
érectophile	verticales	$2(1 - \cos(2\theta))/\pi$	63°
plagiophile	obliques	$2(1 + \cos(4\theta))/\pi$	45°
extrémophile	horizontales et verticales	$2(1 - \cos(4\theta))/\pi$	45°
uniforme	pas d'inclinaison privilégiée	$2/\pi$	45°
sphérique		$\sin(\theta)$	57.3°

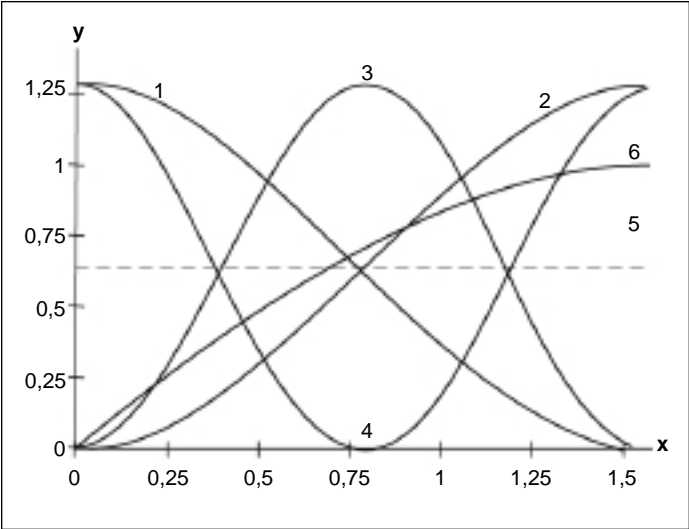


Fig.2.7. Représentation de certaines distributions $g(\theta)$ (θ mesuré en radians) :

- 1) planophile,
- 2) érectophile,
- 3) plagiophile,
- 4) extrémophile,
- 5) uniforme,
- 6) sphérique.

Note. Du point de vue géométrique, la définition de la distribution sphérique correspond à une démarche de même nature que celle qui est utilisée pour construire la loi uniforme. On considère une demi sphère de rayon unitaire. Les points de S sont repérés par leurs coordonnées angulaires θ et ϕ . Soit dS une surface localisée sur S . La probabilité qu'un point M , pris au hasard sur la sphère, soit situé sur dS est proportionnelle à la surface de dS , soit :

$$\frac{\text{surface}(dS)}{\text{surface}(S)}$$

Sur cette base, on montre que la distribution de densité $g(\theta, \phi)$ est égale à $\sin(\theta)/2$ et si, faisant l'hypothèse d'indépendance entre azimuth et inclinaison, on pose $g_2(\phi) = 1/2$, on obtient $g_1(\theta) = \sin(\theta)$. Sous cet éclairage, dire que la distribution des inclinaisons est sphérique revient à dire que, les surfaces des feuilles étant prises égales à l'unité, la distribution des surfaces projetées verticalement sur le plan horizontal est uniforme sur $[0,1]$. La moyenne de la distribution des surfaces projetées est alors égale à 0,5.
D'une façon plus générale, certains auteurs suggèrent d'utiliser, en place de la sphère, un ellipsoïde. On obtient :

$$g_1(\theta) = \frac{2k^3 \sin(\theta)}{K(\cos^2 \theta + k^2 \sin^2 \theta)} \quad k = b/a \quad K = k + 1,774(k + 1,182)^{-0,733}$$

(a : le demi axe horizontal de l'ellipsoïde et b : le demi axe vertical). Pour $k = 1$, on retrouve la distribution sphérique. La valeur de K est issue d'une formule de la surface de l'ellipsoïde). Notons que :

$$\bar{\theta} = 150 / (\bar{k} + 5/3)$$

Cette modélisation, dont la pertinence est limitée à certaines espèces, dispose de la capacité d'adaptation que lui procure le choix judicieux du paramètre k (forme plus ou moins allongée de l'ellipsoïde).

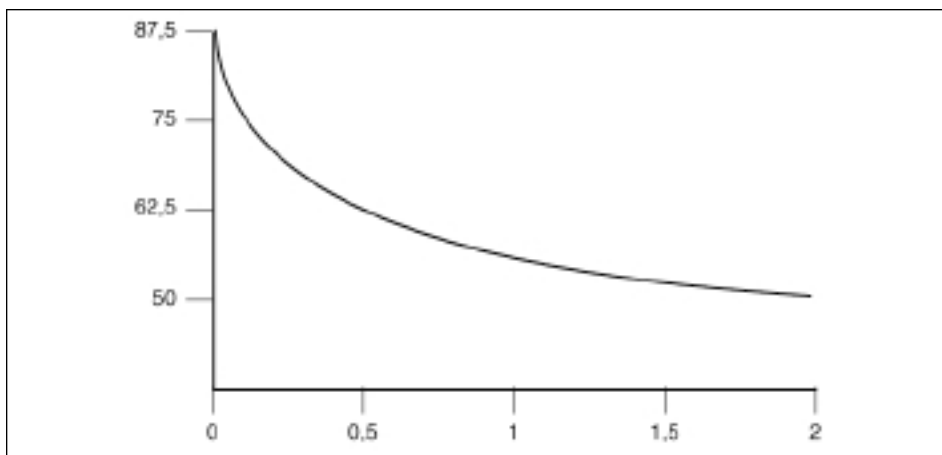


Fig. 2.8. Graphe de $\bar{\theta}$ (mesuré en degrés) en fonction de k (pour $0 \leq k \leq 2$). Pour $k = 0$, $\bar{\theta} = 90^\circ$; pour $k = 1$, $\bar{\theta} = 57,3^\circ$; pour $k = 2$, $\bar{\theta} = 0$. On remarquera que toutes les valeurs de $\bar{\theta}$ peuvent être atteintes pour une valeur pertinente de k .

3. Interception du feuillage par un faisceau de direction D

Cette approche de l'organisation du feuillage (abondance, répartition spatiale, position angulaire) peut être valorisée dans l'observation du nombre de contacts entre un rayon de direction D et le feuillage ou lors du calcul de la fraction de trouées. Par fraction de trouées, on entend la probabilité pour un rayon D de traverser le couvert sans rencontrer d'obstacle ou, autre formulation, la proportion d'un flux de direction D qui atteint le sol sans avoir rencontré de feuilles. De manière plus intuitive, on peut se référer à la proportion de surface du sol directement éclairée dans la direction D par rapport à la surface totale.

Remarque : la direction D (D est un vecteur unitaire) est souvent concrétisée par un rayon lumineux ou par la direction d'observation. Pour cette raison, elle sera caractérisée par sa hauteur angulaire h (de préférence à son inclinaison) et son azimut ϕ . Attention : cette convention n'est pas générale et de nombreux modèles, pour ne pas dire la plupart, préfèrent utiliser l'angle d'inclinaison $\theta = \pi/2$ de la direction D .

$$0 \leq h \leq \frac{\pi}{2} \quad 0 \leq \phi < 2\pi$$

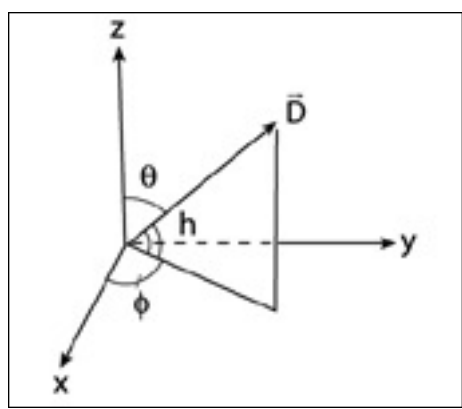


Fig. 2.9. Représentation des angles associés à l'azimut et à la hauteur d'une direction de vecteur unitaire \vec{D} .

3.1. Projection du feuillage par un faisceau de direction D

Etant donné une surface S (la feuille) caractérisée par les coordonnées angulaires (θ, ϕ) de sa normale \vec{n} , les projections de S sur le plan perpendiculaire à \vec{D} , soit S' , et sur le plan horizontal (O, x, y) , soit S_o , ont pour valeurs :

$$S' = S \vec{D} \cdot \vec{n} \quad \frac{S'}{S} = \vec{D} \cdot \vec{n}$$

$$S_o = S' / \sin(h) = S \vec{D} \cdot \vec{n} / \sin(h) \quad \frac{S_o}{S} = \frac{\vec{D} \cdot \vec{n}}{\sin(h)}$$

où $\vec{D} \cdot \vec{n} = \cos(\alpha)$ est le produit scalaire entre les vecteurs unitaires \vec{D} et \vec{n} (fig. 2.10).

La valeur absolue du produit scalaire est une fonction des coordonnées angulaires h, ϕ, α et que nous noterons $G(h, \phi, \alpha)$. On montre que

$$G(h, \phi, \alpha) = \vec{D} \cdot \vec{n} = \cos(h) \sin(\alpha) + \sin(h) \cos(\alpha) \cos(\phi - \phi_0) \quad (1)$$

On peut de manière équivalente définir un projecteur sur le plan horizontal

$$G_o(h, \phi, \alpha) = \frac{G(h, \phi, \alpha)}{\sin(h)}$$

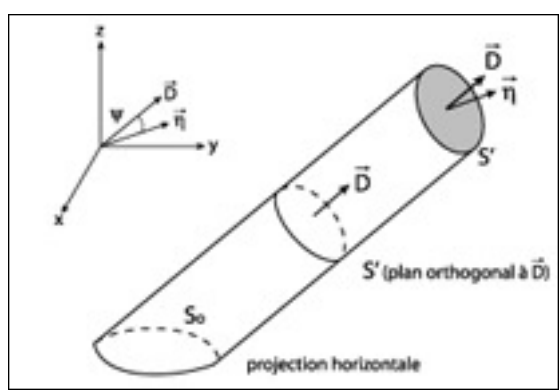


Fig. 2.10. Projections d'une surface S sur le plan perpendiculaire à D et sur le plan horizontal. On remarquera que $S' \leq S$ mais que S_o peut être inférieur, égal ou supérieur à S .

Considérons $g(\alpha, \beta)$, la densité de distribution de l'orientation des feuilles. Sous les hypothèses d'indépendance des distributions des angles α et β et de distribution uniforme de β (voir 2.3).

$$g(\alpha, \beta) = \frac{1}{2} g_1(\alpha)$$

On peut définir des opérations de projections moyens. Ainsi, pour une inclinaison particulière on aura :

$$G(h, \alpha) = \int_0^{\pi/2} g(\alpha, \beta) G(h, \alpha, \beta) d\beta = \frac{g_1(\alpha)}{2} \int_0^{\pi/2} G(h, \alpha, \beta) d\beta$$

L'hypothèse faite sur $g_2(\alpha)$ a une conséquence importante : la fonction K définie par :

$$K(h, \alpha) = \frac{1}{2} \int_0^{\pi/2} G(h, \alpha, \beta) d\beta$$

est indépendante de α et de β et peut être considérée comme un coefficient moyen de projection pour les feuilles d'inclinaison α . En revenant à l'expression (1) de $D.n$, on obtient, sans trop de difficultés :

$$\text{si } h < h_o \quad K(h, \alpha) = \cos \alpha \sin(h)$$

$$\text{si } h > h_o \quad K(h, \alpha) = (2 \frac{o - \text{tg}(\alpha)}{\text{tg}(h_o)} - 1) \cos \alpha \sin(h)$$

$$h_o = \arccos\left(-\frac{\text{tg}(h)}{\text{tg}(\alpha)}\right) \quad \frac{\pi}{2} > h_o > \frac{\pi}{4}$$

Remarque : la valeur h_o correspond au changement de signe du produit scalaire $D.n$, c'est-à-dire la valeur de $h_o = \frac{\pi}{2} - \alpha$ pour laquelle $\cos(\frac{\pi}{2} - \alpha) = -\text{tg}(h)/\text{tg}(\alpha)$. On vérifie que les deux expressions de $K(h, \alpha)$ (calculées pour $h < h_o$ et $h > h_o$) prennent la même valeur pour $h = h_o$. Quant à $G(h, \alpha)$, fonction indépendante de α , elle peut s'écrire :

$$G(h, \alpha) = g_1(\alpha) K(h, \alpha)$$

La fonction $G(h, \alpha)$ a été étudiée pour α fixé. Concrètement, une telle attitude revient à ne prendre en compte que les feuilles d'inclinaison α .

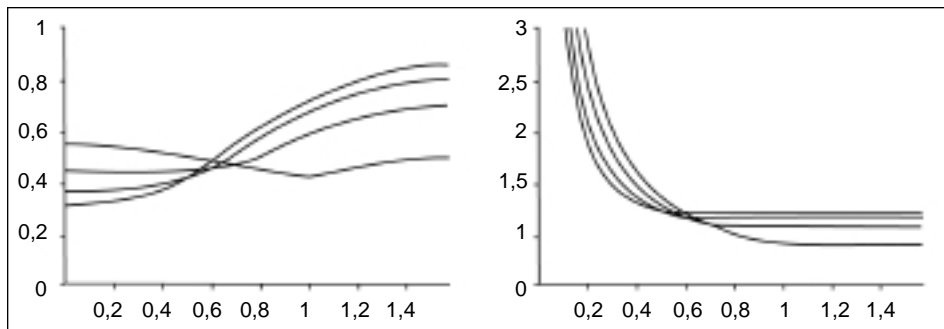


Fig. 2.11. Représentation de $G(h, \alpha)$ et $G_0(h, \alpha)$ en fonction de h et pour différentes valeurs de α ($\alpha = \pi/6, \pi/5, \pi/4$ et $\pi/3$) (voir fig.2.15).

Comportement de la projection moyenne des feuilles d'inclinaison dans la direction D : $G(h, \theta)$:

En observant la figure 2.11, on peut constater que la fonction de projection $G(h, \theta)$ est, pour une direction de D telle que $h \approx 32,5^\circ$, presque indépendante de θ et sensiblement égale à 0,5.

Comportement de $G(h)$, la projection moyenne dans la direction D .

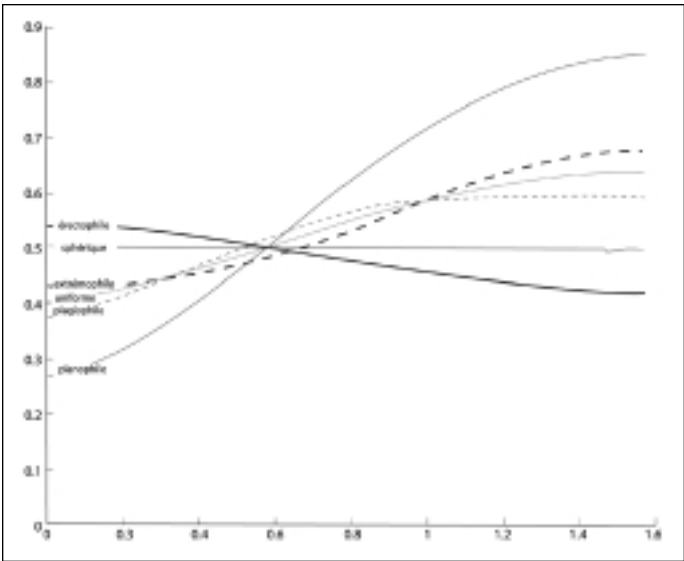


Fig. 2.12. Représentation de $G(h)$ pour différentes expressions de $g_1(\theta)$.

Pour $g(\theta, \phi) = g_1(\theta)/2$, on peut écrire les expressions de $G(h, \theta)$ et de $G_o(h, \theta)$ sous la forme de $G(h)$ et de $G_o(h)$.

$$G(h) = \int_0^{1/2} K(h, \theta) g_1(\theta) d\theta \qquad G_o(h) = G(h) / \sin(h)$$

On peut s'interroger sur la forme de $G(h)$ pour différentes expressions de la densité $g_1(\theta)$ (planophile, érectophile... et sphérique). On voit que pour la distribution sphérique, on a $G(h) = 0,5$. Autrement dit, pour la distribution sphérique le projecteur est indépendant de h . Ce résultat n'est pas étonnant dès lors qu'on le rapproche de ce qui a été observé dans la note du paragraphe 2.3.2. Il va être exploité par différentes méthodes d'estimation du LAI.

Remarque : dans la plupart des cas, pour calculer l'intégrale qui définit $G(h)$, on a recours à une approche numérique qui conduit à discrétiser la fonction à intégrer (voir 2.3).

$$0 = \theta_0 < \theta_1 < \theta_2 \dots \dots \dots < \theta_i < \theta_{i+1} \dots \dots \dots < \theta_{i+1} = \pi/2$$

$$g_1(\theta) \approx [p_1, p_2, \dots, p_p] \text{ avec } p_i = \int_{\theta_{i-1}}^{\theta_i} g_1(\theta) d\theta$$

$$K(h, \theta) = [K_1(h), K_2(h), \dots, K_p(h)] \quad K_i(h) = K(h, \frac{i-1}{2} + \frac{\theta}{2})$$

$$G(h) = \sum_i K_i(h) p_i$$

$$G_o(h) = \frac{G(h)}{\sin(h)} = \sum_i K_{oi}(h) p_i \quad K_{oi}(h) = \frac{K_i(h)}{\sin(h)}$$

On a déjà vu que l'on pouvait mesurer sur le feuillage les valeurs des p_i (voir 2.3. ici $p_i = n_{i0}/N$) et calculer les $K_i(h)$. Toutefois, plus couramment, on calcule p_i en se donnant une expression réaliste de la fonction $g_i(\theta)$:

$$p_i = \int_{\theta_{i-1}}^{\theta_i} g_i(\theta) d\theta \quad g_i(\theta) = g(\frac{i-1}{2} + \frac{\theta}{2}) [\theta_i - \theta_{i-1}]$$

3.2. Contact entre le feuillage et une sonde de direction D

On introduit une sonde de direction D . Plus précisément, on imagine un rayon de direction D , et autour de la droite D un cylindre C de rayon r . En traversant le feuillage la sonde découpe sur chaque feuille f , de surface S_f , une surface $S_f \cap C$. La projection de $S_f \cap C$ sur le plan perpendiculaire à D est égale au produit $(S_f \cap C)G(h, \theta, \phi)$ et la projection moyenne, qui tient compte de la distribution $g(\theta, \phi)$, a pour valeur :

$$\iint (S_f \cap C)G(h, \theta, \phi) g(\theta, \phi) d\theta d\phi = (S_f \cap C)G(h, \theta)$$

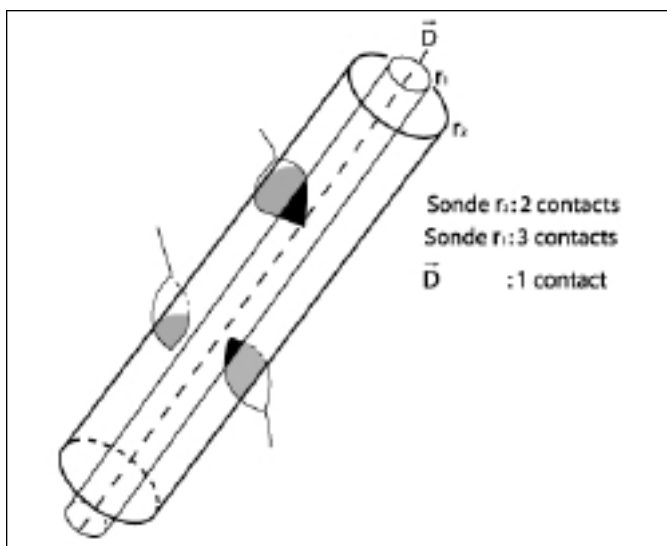


Fig. 2.13. Interception du feuillage par la sonde de direction D .

Soit $N(h, r)$ le nombre de feuilles interceptées par la sonde. On précisera plus loin les suppositions éventuelles sur la longueur de la sonde. Pour r suffisamment petit,

la projection de $S_f - C$ sur le plan perpendiculaire à D est sensiblement égale à r^2 . Dans ces conditions, on a :

$$\left[\frac{(S_f - C)}{r^2} \right] G(h, \phi) = r^2 N(h, \phi, r)$$

$$\left[\frac{(S_f - C)}{2r} \right] G(h, \phi) = N(h, \phi, r) \quad \text{si } r \rightarrow 0 \quad N(h, \phi) = L'G(h, \phi)$$

Avec L' (limite du rapport $[(S_f - C) / r^2]$ le cumul des surfaces foliaires contenues dans le cylindre rapporté à l'unité de surface de la section du cylindre. Comme le LAI , L' est sans dimension. D'ailleurs L' peut être considéré comme un indice de surface foliaire associé à une direction D (voir 2.1.). Pour une première distribution aléatoire des feuilles dans l'espace, L' est indépendante de la position du cylindre (voir 2.2.). Elle ne dépend que de la longueur de la sonde. Par contre, tant que l'on n'a pas fait d'hypothèse sur la distribution azimutale de l'inclinaison des feuilles, la fonction G dépend de ϕ . Supposons que le cylindre C soit de longueur d , soit C_d . De manière complémentaire, on peut introduire $\tau(h, \phi)$ le nombre de contacts par unité de longueur dans la direction D et u la densité de surface foliaire par unité de volume qui correspond à la limite de :

$$\frac{(S_f - C_d)}{r^2 d}$$

lorsque r tend vers zéro, on obtient :

$$\tau(h, \phi) = u G(h, \phi)$$

u est de dimension m^{-1} et, sous l'hypothèse de distribution aléatoire, u est indépendante de (h, ϕ) . On peut simplifier l'expression précédente si l'on suppose que la distribution azimutale est homogène, donc indépendante de ϕ :

$$\tau(h) = u G(h)$$

D'autre part, cette relation a une retombée importante dans le cas de la distribution sphérique pour laquelle $G(h) = 0,5$ soit :

$$u = 2 \tau(h)$$

Dans ces conditions, si $\tau(h)$ est mesuré pour différentes valeurs de h , on peut envisager de calculer u comme la moyenne pondérée des différentes mesures. Le coefficient de pondération le plus pertinent semble être celui que génère la distribution sphérique elle-même, soit $\sin(\theta) = \cos(h)$; on obtient (Miller J.B., 1967) :

$$u = 2 \int_0^{\pi/2} \tau(h) \cos(h) dh$$

Lorsque l'on prend en compte la dimension du couvert (la longueur du cylindre) tout en maintenant les hypothèses précédentes sur la distribution des feuilles, on obtient :

$$N_0(h) = \frac{G(h) LAI}{\sin(h)} \quad LAI = \frac{N_0(h) \sin(h)}{G(h)}$$

$N_0(h)$ correspond au nombre de contacts enregistrés lors d'une traversée complète du couvert dans la direction D .

Remarque : si l'on se reporte au paragraphe 2.1. et que l'on considère une sonde telle que $h = 32,5^\circ$ et $G(h) \approx 0,5$ pour toute valeur de D , on a :

$$u = 2r \quad LAI = 1,1N_0(h)$$

Il suffit de considérer un p échantillon correspondant à différentes mesures effectuées pour $h = 32,5^\circ$, (soit r_1, r_2, \dots, r_p ou n_1, n_2, \dots, n_p), pour obtenir une estimation rapide de u ou de LAI :

$$u = \frac{r_1 + r_2 + \dots + r_p}{2_p} \quad LAI = 1,1 \frac{n_1 + n_2 + \dots + n_p}{p}$$

Ce résultat est utilisé dans la méthode dite des aiguilles (Warren Wilson J., 1963). En pratique, les spécialistes conseillent d'utiliser plusieurs directions ($h = 0^\circ, h = 90^\circ, h = 32,5^\circ$ ou $h = 45^\circ, h = 90^\circ, h = 32,5^\circ$).

3.3. Fraction ou fréquence de trouées

Dans ce paragraphe, on fait l'hypothèse que la distribution azimutale est uniforme et on exploite les éléments introduits en 2.1. La fraction de trouées est définie comme la probabilité $P_0(h)$ pour qu'un rayon lumineux de hauteur h , traversant le couvert, ne soit pas intercepté par le feuillage. Plusieurs relations existent entre les paramètres de structure du feuillage et la fraction de trouées. Ces relations dépendent de la distribution spatiale des éléments foliaires.

3.3.1. Dispersion aléatoire

Lorsque l'on navigue dans le couvert, en allant du sommet vers le sol, l'indice foliaire varie entre $L = 0$ (au dessus du couvert, il n'y a pas de feuilles) jusqu'à la valeur au sol, soit $L = LAI$ (voir 2.1). Considérons le niveau pour lequel l'indice a pour valeur L et soit $P(h, L)$ la probabilité qu'un faisceau de hauteur angulaire h ait pénétré jusqu'au niveau L sans être intercepté. On gardera à l'esprit que le niveau L correspond à une coupe horizontale du couvert.

Soit dL suffisamment petit pour ne contenir, potentiellement, qu'une seule couche foliaire. Dans ces conditions, on exclut la possibilité qu'il y ait plus d'une interception dans la bande d'épaisseur dL . Soit p la probabilité que le faisceau rencontre une feuille entre les niveaux L et $L+dL$; p est sensiblement égal à :

$$p = \frac{G(h)dL}{\sin(h)}$$

Remarque : dL est l'accroissement de L par unité de surface, $G(h)dL/\sin(h)$ est la projection de dL sur le plan horizontal. On fait l'hypothèse que la fonction G est indépendante de D .

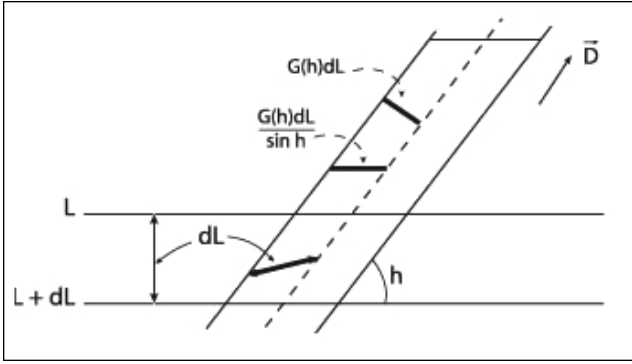


Fig.2.14. Bases graphiques de la construction de p et de $P_0(h, L)$.

Si l'on suppose que la répartition des feuilles est aléatoire, il y a indépendance entre ce qui se passe entre $[0, L]$ et entre $[L, L + dL]$. Dans ces conditions, on a en termes de probabilité :

$$P(h, L + dL) = P(h, L) (1 - p)$$

$$dP(h, L) = P(h, L + dL) - P(h, L) = -P(h, L)p$$

$$\frac{dP(h, L)}{P(h, L)} = \frac{G(h)}{\sin(h)} dL$$

soit en intégrant :

$$P(h, L) = \exp\left(-\frac{G(h)}{\sin(h)} L\right)$$

On remarquera que $P(h, L)$ est une fonction décroissante de L . Au sol, pour $L = LAI$:

$$P_0(h) = P(h, LAI) = \exp(-LAI G(h) / \sin(h))$$

Remarque : comme on a déjà eu l'occasion de le noter, la répartition des feuilles dans le couvert n'est pas aléatoire et d'autres obstacles que les feuilles se dressent sur le parcours de la lumière. Certains praticiens (Nilson T., 1971) proposent de corriger l'expression de $P_0(h)$ par l'introduction d'un coefficient correcteur plus ou moins complexe et plus ou moins élaboré, soit : $P_0(h) = \exp(-LAI G(h)/\sin(h))$.

Note. Cette expression est souvent rapprochée de celle qui traduit l'extinction d'un faisceau lumineux pénétrant dans un milieu opaque. Si $I(z)$ désigne l'intensité lumineuse, z la profondeur de pénétration, on admet que :

$$I(z) = I(0) \exp(-kz) \quad (\text{loi dite de Beer-Lambert})$$

La constante k est le coefficient d'extinction et caractérise le milieu. Par analogie, $G(h)/\sin(h)$ est aussi baptisé "coefficient d'extinction" (voir 5.2).

Remarque : on voit que la connaissance de $P_0(h)$, la fraction de trouées dans la direction h , et la modélisation de $G(h)$ permettent d'obtenir, par inversion, l'indice foliaire :

$$LAI = -\frac{\sin(h)}{G(h)} \text{Log}(P_0(h))$$

Cette propriété sera exploitée en 3.4.

Remarque : si l'on considère le nombre de contacts avec un rayon de hauteur h , on a :

$$P_0(h) = \exp(-N_0(h))$$

Cette relation "apparente" les méthodes dites des trouées et des contacts. Mais attention, la robustesse de cette simplification est très dépendante des hypothèses faites sur la répartition aléatoire des feuilles.

3.3.2. Autres systèmes de dispersion

L'hypothèse faite sur la nature aléatoire de la dispersion du feuillage n'est que très rarement vérifiée globalement. Dans de nombreuses situations, d'autres spéculations sont possibles (Nilson T., 1971). A titre indicatif, nous allons présenter d'autres approches qui sont mobilisées pour calculer la fraction de trouées.

Le modèle binomial. Le feuillage est découpé du haut de la canopée au sol en N couches contenant potentiellement une même part dL de l'indice foliaire (dL est l'accroissement rapporté à l'unité de surface horizontale). On suppose le couvert traversé par un faisceau de direction D et on étudie son comportement en fonction de la répartition spatiale du feuillage.

A - Distribution aléatoire

On fait l'hypothèse que dL est suffisamment petit pour que le nombre d'interceptions entre le feuillage et D soit égal à 1 ou 0 avec les probabilités respectives p_1 et p_0 (voir fig. 2.15) :

$$p_1 = \frac{G(h)}{\sin(h)} dL \quad \text{et} \quad p_0 = 1 - \frac{G(h)}{\sin(h)} dL$$

Pour N bandes ($N = LAI/dL$), on obtient :

$$P_0(h) = p_0^N = \left(1 - \frac{G(h)}{\sin(h)} dL\right)^N$$

Lorsque dL tend vers zéro, on retrouve l'expression précédente :

$$P_0(h) = \exp\left(-LAI \frac{G(h)}{\sin(h)}\right)$$

• Distribution régulière

On opère de la même manière mais il faut considérer un découpage qui permette de dépasser les contraintes de régularité qui ne sont pas sans induire des dépendances entre les événements associés à chaque couche d'épaisseur dL . On retrouve l'expression précédente, soit :

$$P_0(h) = \exp\left[\frac{LAI}{dL} \log\left(1 - \frac{G(h)}{\sin(h)} dL\right)\right]$$

Mais la valeur optimale de LAI/dL est fonction de la maille du treillis qui génère la régularité de la distribution.

• Distribution agrégative

Revenons vers le découpage du feuillage en bandes, mais cette fois le nombre de contacts dans chaque couche peut être supérieur à 1. La variable associée au nombre de contact par bande est modélisée par une distribution géométrique. Dans ces conditions, pour chaque couche, et en reprenant les notations précédentes :

$$p_0 = \frac{1}{1 + \frac{G(h)}{\sin(h)} dL}$$

Et pour N couches :

$$P_0(h) = p_0^N = \exp\left[-\frac{LAI}{dL} \text{Log}\left(1 + \frac{G(h)}{\sin(h)} dL\right)\right]$$

• Comparaison entre les distributions

Au signe près, les expressions de $P_0(h)$ pour les distributions régulière et agrégative sont semblables.

+ dL : distribution régulière - dL : distribution agrégative

Dans les deux cas, la valeur de $P_0(h)$, lorsque dL tend vers zéro, est équivalente à celle calculée pour une distribution aléatoire. Dans toutes les configurations, la valeur du nombre de contacts moyen, pour LAI donné, est égale à $G(h)LAI/\sin(h)$. Ce qui diffère essentiellement, c'est la valeur de p_0 , plus élevée dans le cas d'une distribution agrégative.

B - Le modèle markovien. On opère sur les mêmes bases que précédemment, c'est-à-dire en découpant le couvert en tranches d'épaisseur dL , mais on fait dépendre la probabilité d'interception sur la couche c de ce qui est advenu sur la couche $c - 1$. Autrement dit, la probabilité d'interception dans une couche d'épaisseur dL s'écrit :

$$\mu \frac{G(h)}{\sin(h)} dL \quad \text{si une interception est advenue dans la couche précédente}$$

$$\mu_0 \frac{G(h)}{\sin(h)} dL \quad \text{dans le cas contraire}$$

μ et μ_0 sont deux paramètres qui traduisent le degré de dépendance entre les couches. Evidemment, ils ne sont pas indépendants. Retenons que leur estimation est difficile, ce qui limite l'utilisation de cette approche (Lemeur R. et Blad. B.L., 1974). On obtient :

$$P_0(h) = \left(1 - \frac{G(h)}{\sin(h)} dL\right) \exp\left[\frac{L - dL}{dL} \text{Log}\left(1 - \mu_0 \frac{G(h)}{\sin(h)} dL\right)\right]$$

Remarque : si $dL \rightarrow 0$, alors $P_0(h) = \exp\left[-\mu_0 \frac{G(h)}{\sin(h)}\right]$

Remarque : pour $\mu_0 = 1$, on retrouve l'expression associée à la distribution aléatoire. Pour une distribution régulière, on a $\mu_0 > 1$, pour une distribution agrégative $\mu_0 < 1$.

4. Estimations de l'indice foliaire et de l'inclinaison moyenne

4.1. Estimation de l'indice foliaire

4.1.1. Formulation des équations de base

Pour estimer LAI , les méthodes mises en œuvre sont basées sur l'estimation de la fraction de trouées $P_0(h)$ et sur la modélisation de $G(h)$. La difficulté est l'appréciation de $G(h)$.

$$P_0(h) = \exp\left(-\frac{G(h)}{\sin(h)} LAI\right) \quad L_N[P_0(h)] = -\frac{G(h)}{\sin(h)} LAI$$

où L_N désigne le logarithme népérien.

Pratiquement, on discrétise la répartition des angles d'inclinaison des feuilles en n classes :

$$0 = \theta_0 < \theta_1 < \theta_2 \dots \dots \dots < \theta_i < \theta_{i+1} \dots \dots < \theta_n = \pi/2$$

Dans ces conditions, on a vu au paragraphe 3.1. que l'on pouvait écrire :

$$G(h) = \sum_{i=1}^{i=n} K_i(h, \frac{\theta_{i-1} + \theta_i}{2}) p_i = \sum_i K_i(h) p_i$$

$$L_N[P_0(h)] = - \sum_i \frac{K_i(h)}{\sin(h)} L_i$$

$$L_i LAI = \sum_{i=1}^{i+1} g_i(\theta) = LAI p_i \quad K_i(h) = K(h, (\theta_{i-1} + \theta_i) / 2)$$

expression dans laquelle $K_i(h)$ (voir 3.1.) et L_i sont respectivement les coefficients de projection et les surfaces foliaires associées aux feuilles dont l'inclinaison est comprise entre θ_i et θ_{i+1} .

$$LAI = \sum_i L_i p_i = \sum_i L_i$$

D'autre part, $P_0(h)$ peut être évalué pour différentes valeurs de h , soit $h_1, h_2, \dots, h_p, \dots, h_m$ ce qui induit m équations de la forme :

$$L_N[P_0(h_l)] = - \sum_i \frac{K_i(h_l)}{\sin(h_l)} L_i = - \sum_i K_{li} L_i \quad \text{avec} \quad K_{li} = \frac{K_i(h_l)}{\sin(h_l)}$$

4.1.2. Résolution matricielle

Matriciellement, le système précédent s'écrit (Norman J.M. et Campbell G.S., 1989) :

$$\begin{bmatrix} L_N[P_0(h_1)] \\ - \\ - \\ L_N[P_0(h_m)] \end{bmatrix} = \mathbf{K} \begin{bmatrix} L_1 \\ - \\ - \\ L_n \end{bmatrix} \quad \mathbf{K} = [K_{li}]_{m,n}$$

La matrice \mathbf{K} est une matrice de projection qui fait passer des surfaces foliaires L_i aux fréquences de trouées $P_o(h)$. Autres notations plus condensées :

$$\mathbf{L}_N = \begin{bmatrix} L_N[P_o(h_l)] \\ - \\ - \\ L_N[P_o(h_m)] \end{bmatrix} \quad \mathbf{L} = \begin{bmatrix} L_1 \\ - \\ - \\ L_n \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{L}_N = \mathbf{KL}$$

Les variables $P_o(h_l)$ sont observées, les facteurs K_{li} sont évalués sur la base d'une modélisation de l'orientation des feuilles. Pour obtenir les valeurs des L_i il suffit de résoudre le système matriciel que nous venons de mettre en évidence.

On se retrouve en présence d'un problème classique d'algèbre linéaire. Soit :

- Si $n = m$: il y a une solution unique.
- Si $n > m$: il y a plus d'inconnues (les L_i) que d'équations. Le système est indéterminé. La meilleure attitude est de limiter ses ambitions en réduisant n .
- Si $n < m$: le système est surdéterminé. Il y a plus d'équations que d'inconnues et généralement pas de solution. Sauf à changer son fusil d'épaule et à considérer que l'absence de solution naît d'une mauvaise adéquation entre les observations et le modèle. On se retrouve alors devant un problème qui relève de la statistique et plus précisément des méthodes d'ajustement. Dans ces conditions, on cherche les valeurs des L_i qui minimisent la fonction des moindres carrés $\Delta (L_1, L_2 \dots L_n)$:

$$\Delta(L_1, L_2 \dots L_n) = \|\mathbf{L}_N - \mathbf{KL}\|^2 = \sum_i (L_N[P_o(h_l)] - \sum_i K_{li}L_i)^2$$

Classiquement, on obtient les estimations des L_i en analysant le système de n équations à n inconnues suivant :

$$\sum_{i=1}^n \frac{(L_1, \dots, L_n)}{L_i} = 0 \text{ soit } \mathbf{K}'\mathbf{KL} = \mathbf{K}'\mathbf{L}_N$$

Généralement la matrice $\mathbf{K}'\mathbf{K}$ (\mathbf{K}' transposée de \mathbf{K}) est inversible et la solution est de la forme : $\mathbf{L} = (\mathbf{K}'\mathbf{K})^{-1}\mathbf{K}'\mathbf{L}_N$. Toutefois, la solution n'est pas nécessairement acceptable. Tout au moins dans l'esprit du praticien. C'est le cas lorsque la résolution du système conduit à des estimations des L_i négatives. Pour cette raison, certains logiciels proposent de travailler "sous contraintes". Par exemple, en limitant la recherche à des estimations positives des L_i ou, ce qui paraît plus sophistiqué, en imposant aux valeurs des L_i une distribution la moins chaotique possible. Par exemple en introduisant des conditions du genre $L_i = (L_{i-1} + L_{i+1})/2$. Techniquement parlant, on peut dire que l'on effectue un lissage des L_i . Matriciellement, une telle contrainte s'écrit :

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 2 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 2 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \\ L_3 \\ L_4 \\ L_5 \end{bmatrix} \text{ soit } \mathbf{0} = \mathbf{HL}$$

La solution du système est obtenue par la méthode dite des multiplicateurs de Lagrange (optimisation sous contraintes) :

$$\mathbf{L} = (\mathbf{K}'\mathbf{K} - \mathbf{H})^{-1}\mathbf{K}'\mathbf{L}_N$$

La valeur de L_i est prise aussi petite que possible, afin de minimiser le poids des contraintes, avec pour préoccupation principale d'obtenir des estimations positives des valeurs L_i .

In fine, on obtient, sous réserve d'une certaine bonne volonté du système, une évaluation de L : $L = L_i$.

4.2. Autres méthodes d'estimation

4.2.1. Modèle ELP (*Ellipsoidal Inversion*)

On fait l'hypothèse que la distribution de l'inclinaison des feuilles peut être modélisée par la distribution ellipsoïdale (voir 2.3.2). Cette distribution dépendant d'un paramètre k qui caractérise la forme de l'ellipsoïde de référence. Ce paramètre va se retrouver dans l'expression de $G(h)$ et de $G_o(h)$:

$$G(h) = \int_0^{\pi} K(h, \theta) g_1(\theta) d\theta \quad G_o(h) = \frac{G(h)}{\sin(h)}$$

avec (voir 2.3.2.)

$$g_1(\theta) = \frac{2k^3 \sin \theta}{[k + 1,774(k + 1,182)^{-0,733}] [\cos^2 \theta + k^2 \sin^2 \theta]}$$

Dans ces conditions, il est naturel de noter les projecteurs $G(h,k)$ et $G_o(h,k)$ pour rendre compte du lien avec le paramètre k . On obtient (Campbell G.S., 1986) :

$$G_o(h,k) = \frac{[(k^2 + \tan^2(h))^{1/2}]}{k + 1,774(k + 1,182)^{-0,733}}$$

Pour calculer LAI et k , on va considérer plusieurs directions (h_1, h_2, \dots, h_m) et chercher à minimiser $\Delta(LAI, k)$ sur l'ensemble de ces directions (méthode des moindres carrés) :

$$\Delta(LAI, k) = \sum_l (L_N P_o(h_l)) - G_o(h_l, k) LAI)^2$$

On obtient sans trop de difficultés $G_o'(h_l, k)$ désignant la dérivée de G_o par rapport à k :

$$LAI = - \frac{\sum_l L_N [(P_o(h_l)) G_o'(h_l, k)]}{\sum_l G_o(h_l, k) G_o'(h_l, k)} = - \frac{\sum_l L_N [(P_o(h_l)) G_o(h_l, k)]}{\sum_l [G_o(h_l, k)]^2}$$

La valeur de k est calculée à l'aide d'une approche numérique itérative de cette relation et on en déduit l'indice foliaire. Cette méthode ne donne pas la répartition

de l'indice foliaire mais, en revanche, elle informe sur la distribution de l'inclinaison des feuilles par le biais de l'estimation de k .

4.2.2. Les méthodes proposées par Lang

Dans cette présentation, nous jonglerons entre nos choix et ceux de Lang. Plus précisément, Lang choisit de positionner la direction D par la valeur de son inclinaison, soit $\pi/2 - h$. Pour pouvoir récupérer les outils confectionnés par Lang, on est contraint à un peu de gymnastique intellectuelle.

Modèle de Lang 1 (Lang A.R.G., 1990)

La méthode repose sur la simplification suivante : Lang considère que le nombre de contacts moyen par unités de longueur, $\tau(h)$, entre le feuillage et une sonde de direction D (hauteur h) peut être ajusté par une droite :

$$\tau(h) = A + Bh$$

Remarque. Ajuster $\tau(h)$ par une fonction linéaire de h peut sembler audacieux. En réalité, si l'on observe les variations de $G(h)$ pour h constant ou pour une distribution particulière de $g(\cdot)$, on constate que pour h compris dans un intervalle approprié, une telle hypothèse n'est pas extravagante. Lang propose différents ajustements dont celui de la figure 15 calculé pour $h_1 = 25^\circ$ et $h_2 = 65^\circ$. Le nombre de contacts étant, sous réserve d'hypothèses convenables, directement lié à $G(h)$ ($G(h) = uG(h)$), la tentation est bien naturelle de linéariser.

D'autre part, on a vu (3.1.) que, dans le cas d'une distribution sphérique des inclinaisons, $G(h, \cdot)$ était égal à 0,5 et que $u = 2 \int_0^{\pi/2} \tau(h) \cos(h) dh$, soit en remplaçant $\tau(h)$ par sa nouvelle expression :

$$u = 2 \int_0^{\pi/2} (A + Bh) \cos(h) dh = 2(A - B + B \frac{\pi}{2})$$

La référence à la distribution sphérique associée à la linéarisation de τ permet d'obtenir une estimation rapide de la densité foliaire u .

Remarque. Lors de nombreuses présentations, en particulier dans l'article de Lang, on utilise pour positionner la direction D l'angle $\theta = \pi/2 - h$; ce choix conduit à écrire :

$$\tau(\theta) = a + b\theta \quad \text{et} \quad u = 2 \int_0^{\pi/2} (a + b\theta) \cos(\theta) d\theta = a + b$$

Les deux formulations sont équivalentes dès lors que l'on pose $a = A + B \pi/2$ et $b = -B$.

Dans ces conditions, il suffit d'établir pour plusieurs valeurs de h la relation $(h, \tau(h))$, d'ajuster une droite au nuage de points correspondant pour obtenir des estimations de A et B , et *in fine* une évaluation de u . En utilisant les dimensions du couvert, en particulier la hauteur du peuplement et si besoin l'épaisseur du feuillage, on obtient le LAI. Cette méthode n'est pas sans rappeler l'approche suggérée à la fin du paragraphe 3.1. En effet $A + B(\pi/2 - 1)$ est la valeur de $\tau(h)$ ramenée à l'unité pour $h = (\pi/2 - 1)$ rad, soit pour $h \approx 32,5^\circ$.

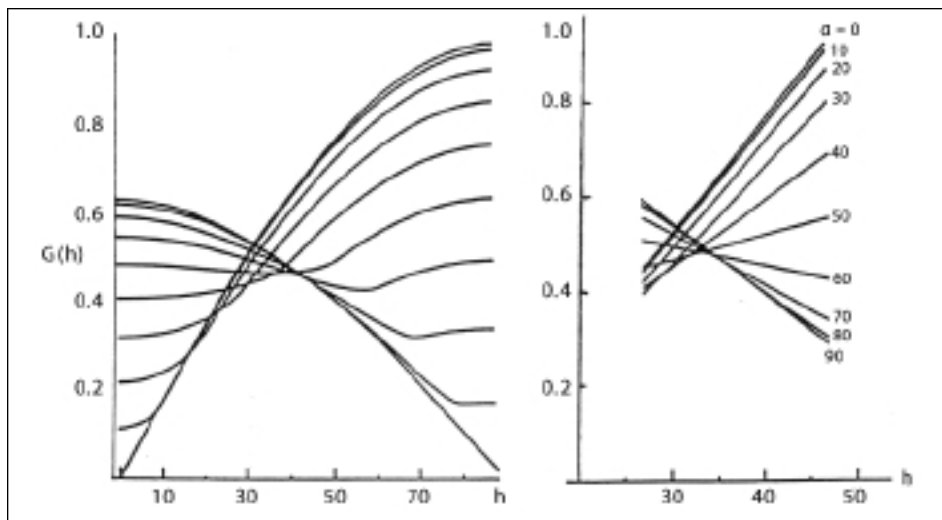


Fig.2.15. Linéarisation de $G(h)$.

Modèle de Lang 2 (Lang A.R.G., 1993)

L'examen des précédents graphiques est porteur d'une autre information : la pente de la droite ajustée est une fonction monotone de α . C'est cette propriété qui est valorisée dans le graphique de la figure 2.16a où l'on a représenté l'évolution de la pente des droites ajustées à G en fonction de α et cela pour différentes valeurs de l'intervalle $[h_1, h_2]$.

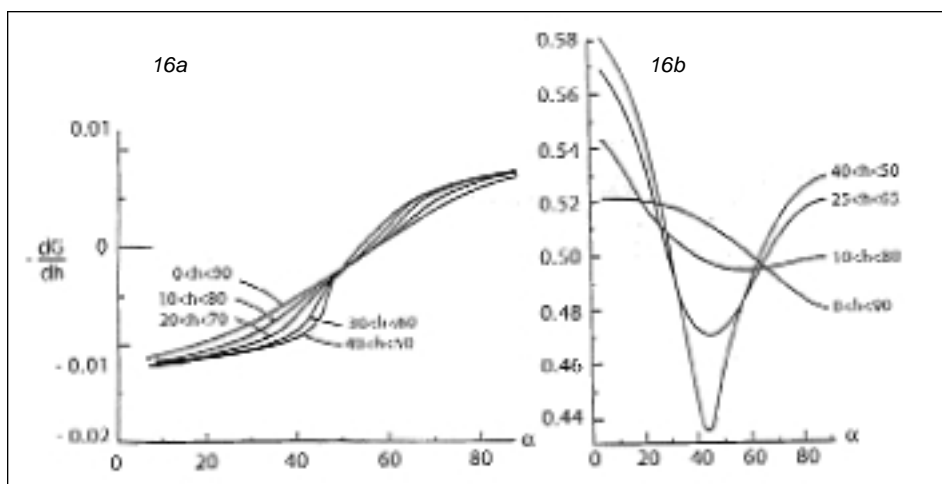


Fig.2.16. Evolution de la pente des droites ajustées à $G(h)$ pour différentes valeurs de $[h_1, h_2]$ (16a) et le passage de l'inclinaison moyenne à une nouvelle estimation de $G(35^\circ)$ (Lang A.R.G., 1993).

On peut donc passer de la connaissance de la pente de la droite à une estimation de l'angle moyen d'inclinaison α . Pour faciliter ce travail, Lang met à la disposition du praticien le graphique de la figure 2.16b qui permet d'obtenir directement $G(h_0)$ en fonction de α .

Appliquons Lang 1. L'auteur propose de reprendre la démarche précédente (Lang 1) qui va permettre d'obtenir une première série d'estimations des principaux paramètres pour h égal à $h_o = 35^\circ$ (selon les choix faits par le praticien, h_o peut être exprimé en degrés ou en radians, la valeur de 35° correspondant au choix fait par Lang).

On a :

$$\begin{aligned} [\tau(h_o)]_1 &= A + Bh_o & [G(h_o)]_1 &= 0,5 \\ [u]_1 &= 0,5 \quad (h_o) & \text{et} & [G'(h_o)]_1 &= B/[u]_1 \end{aligned}$$

Le graphique de la figure 2.16a permet d'évaluer la valeur de l'angle d'inclinaison moyen et à partir de cette évaluation le graphique 16b propose une nouvelle estimation de $[G(h_o)]_2$. D'où une réévaluation de u soit $[u]_2 = [G(h_o)]_2 \quad (h_o)$ puis de $[G'(h_o)]_2 = B/[u]_2$. Ainsi de suite par itération jusqu'à stabilisation des estimations.

Lang justifie la robustesse et la qualité de son approche par l'étude de certaines situations de terrain et la comparaison à certains modèles de référence.

4.3. Estimation de l'angle d'inclinaison

On a déjà abordé ce problème dans le précédent paragraphe. Deux idées semblent devoir être exploitées en priorité : soit inverser la relation entre $G(h)$ et $g_1(\quad)$, soit se donner un modèle particulier de modélisation de la distribution angulaire et en estimer les paramètres.

Dans la première famille, on trouve la méthode graphique utilisée par Lang. En pratique, cette démarche revient à estimer, pour les intervalles $[h_1, h_2]$ les plus usités, l'angle moyen $\bar{\tau}$ par une fonction polynomiale de la dérivée $G'(h)$ en h_o :

$$\bar{\tau} = a_0 + a_1 G'(h_o) + a_2 [G'(h_o)]^2 + a_3 [G'(h_o)]^3 + a_4 [G'(h_o)]^4 + a_5 [G'(h_o)]^5$$

Lang propose des valeurs pour les paramètres a_i calculées pour différentes valeurs de l'intervalle $[h_1, h_2]$.

Dans la seconde famille, on peut identifier la méthode utilisée dans ELP qui conduit à estimer le paramètre de la distribution ellipsoïdale k :

$$\bar{\tau} = \frac{150}{(\bar{k} + 5/3)}$$

5. Rappels sur le comportement des radiations lumineuses

Pour mesurer la fraction des trouées associée à une direction D la plupart des méthodes doivent tenir compte de la nature de la lumière. Les méthodes mises en œuvre se différencient par les technologies utilisées et la part de rayonnement qu'elles mobilisent.

Attention : par abus de langage, on parle parfois de lumière pour désigner l'ensemble du rayonnement solaire, parfois pour désigner la part visible. Le contexte est censé "éclairer" le lecteur.

5.1. Nature de la lumière

Depuis les pères fondateurs de l'optique, plusieurs modèles auront été mobilisés pour traduire scientifiquement le comportement de la lumière. Cette multiplicité des approches peut troubler tout un chacun dans la mesure où elle conduit à utiliser des représentations qui sans être, à proprement parler, contradictoires se rapportent à des expériences et des référentiels différents.

Le modèle géométrique. La lumière est assimilée à un ou des rayons. En milieu homogène, elle se transmet en ligne droite. On ne fait pas d'hypothèses particulières sur la nature du rayon lumineux mais uniquement sur son comportement. Exemple : le principe du "chemin stationnaire" qui pose que dans un milieu hétérogène, mais en l'absence de singularité, le rayon lumineux suit, pour se rendre d'un point A à un point B, la trajectoire qui minimise le temps de parcours entre A et B. Ce temps est le "chemin optique". Ce modèle est implicitement sollicité dans la plupart des représentations graphiques de nos manuels.

Le modèle ondulatoire. La lumière (que l'on supposera, pour l'instant, monochromatique) est assimilée à un système d'ondes électromagnétiques. Parler de système électromagnétique, c'est parler de la superposition d'un champ électrique \mathbf{E} et d'un champ magnétique \mathbf{B} . C'est-à-dire de la superposition de deux systèmes ondulatoires.

Les deux ondes, qui sont associées à \mathbf{E} et à \mathbf{B} , sont transversales et perpendiculaires à la direction de propagation. Elles sont caractérisées par leur fréquence et/ou leur longueur d'onde et/ou leur période T ,

$$T = 1/\nu \quad \lambda = c/\nu = cT$$

ainsi que par leurs amplitudes maximales \mathbf{E}_0 et \mathbf{B}_0 . Autrement dit, dans l'espace, à chaque point P sont associés deux vecteurs orthogonaux \mathbf{E} et \mathbf{B} tels que :

$$\mathbf{E}(t, P) = \mathbf{E}_0 \sin(2\pi \nu t - \dots) \quad \mathbf{B}(t, P) = \mathbf{B}_0 \sin(2\pi \nu t - \dots) \quad \mathbf{E} \cdot \mathbf{B} = 0$$

Phénomène ondulatoire, mais, pour ce qui concerne la lumière naturelle, phénomène composé. Le spectre électromagnétique nous enseigne que l'on est en présence d'une "superposition" de vibrations de différentes longueurs d'onde. Depuis longtemps, on a su observer la nature composite de la lumière. Au moins partiellement. Elle est directement perceptible lorsque l'on regarde un arc-en-ciel.

Le modèle corpusculaire. Cette interprétation, au demeurant très ancienne mais dont la théorisation est récente, suppose que la lumière est formée de grains, les photons, d'énergie $E = h\nu$ où h est la constante de Planck, et ν la fréquence de l'émission. Cette relation montre que plus la fréquence est forte ou plus la longueur d'onde est faible, et plus la qualité d'énergie transportée par le photon associé est importante. Pour assurer la cohérence avec le modèle ondulatoire, on

suppose que les photons de fréquence ν sont associés aux ondes de même fréquence mais c'est l'amplitude de l'onde qui contrôle l'énergie, donc indirectement le nombre de photons émis.

5.2. Les flux

5.2.1. L'angle solide

L'approche géométrique conduit à se repérer dans l'espace en mobilisant les principaux outils associés à la description de l'espace vectoriel \mathbb{R}^3 . C'est ainsi que les points P de l'espace sont repérés par leurs coordonnées sphériques et les directions par des vecteurs :

$$\vec{OP} (r, \theta, \phi) \quad r = |\vec{OP}|$$

et que, pour caractériser le flux lumineux issu d'un point O dans une direction \vec{D} , on utilise souvent la notion d'angle solide $d\Omega(\vec{D})$.

Rappel. L'angle solide peut être défini de la manière suivante : étant donné une surface S , un point O situé à l'extérieur de S et le cône C construit par les génératrices issues de O et s'appuyant sur les contours de S , la valeur de l'angle solide sous lequel on voit S depuis O est égale à la surface (r^2) découpée par le cône C sur une sphère de rayon r divisé par r^2 , soit $(r^2)/r^2$. Cette valeur est indépendante de r (propriété homothétique). Si l'on considère une surface élémentaire dS plane, de normale \vec{n} , centrée sur un point P et \vec{D} la direction associée à l'axe du cône élémentaire $d\Omega(\vec{D})$:

$$d\Omega(\vec{D}) = dS |\vec{D} \cdot \vec{n}| / r^2 \quad \vec{D} \text{ le vecteur unitaire de } \vec{OP} \text{ et } r = |\vec{OP}|$$

$$d\Omega(\vec{D}) = dS |\vec{D} \cdot \vec{n}| / r^2 = dS \cos(\theta) / r^2 \quad \text{avec } \theta = \text{angle}(\vec{D}, \vec{n})$$

Pour un cône de révolution :

$$\Omega = 2\pi (1 - \cos \theta) \quad \theta \text{ le demi-angle du cône}$$

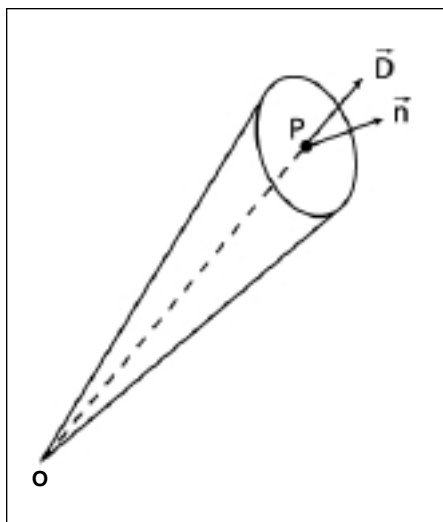


Fig.2.17. Représentation de l'angle solide.

L'unité de mesure est le stéradian (sr). L'angle qui correspond à un hémisphère (demi-sphère) a pour valeur 2π sr.

5.2.2. Définition des paramètres associés aux flux

Décrire le comportement du rayonnement lumineux est insuffisant. Il est nécessaire de pouvoir en quantifier les effets. C'est l'objet de ce paragraphe de rappeler les principaux termes et concepts utilisés à cette fin. La variable fondatrice est le flux émis par une source, reçu par un récepteur ou traversant une surface. Le flux est une puissance, c'est une quantité d'énergie émise par unité de temps. L'unité de mesure est le watt ou le joule par seconde.

Note. On montre que dans un milieu quelconque (vitesse de la lumière égale à c ; c_0 dans le vide), le flux lumineux instantané $d\Phi(t)$ associé à la surface émettrice dS est proportionnel au carré de l'amplitude de la composante "électrique" de l'onde électromagnétique :

$$\frac{d\Phi(t)}{dS} = kE(t)^2 \quad k = \frac{1}{4} \frac{c_0}{c} 10^{-9}$$

La valeur du flux est donc liée aux caractéristiques de l'onde électromagnétique et en particulier à la valeur de son amplitude. Le flux est distribué de manière sphérique autour de la source. Il peut être considéré dans sa globalité ou dans une direction donnée. Par exemple, le flux $\Phi(\Omega)$ est la part de flux émise dans l'angle solide Ω . L'intensité I est la puissance rayonnée par unité d'angle solide. Elle est mesurée en $W \text{ sr}^{-1}$. On a pour un angle solide Ω_0 :

$$I = \frac{d\Phi(\Omega)}{d\Omega} \quad I(\Omega) = \frac{d\Phi(\Omega)}{d\Omega}$$

S'agissant d'un flux lumineux, que l'on peut supposer monochromatique pour simplifier l'exposé, les expressions de l'intensité et de la quantité d'énergie prennent la forme d'une fonction trigonométrique plus ou moins simple.

Pour une source étendue, on découpe la surface en petits éléments d'aire dS , chacun étant considéré comme une source ponctuelle. Considérons deux éléments de surface dS et dS' , leurs normales respectives \vec{n} et \vec{n}' , leurs centres O et O' . Notons θ et θ' les angles que fait la droite OO' avec \vec{n} et \vec{n}' et D la distance OO' . L'angle solide sous lequel dS' est vu de O et l'angle solide sous lequel dS est vu de O' s'écrivent :

$$d\Omega = dS' \cos(\theta') / D^2 \quad d\Omega' = dS \cos(\theta) / D^2$$

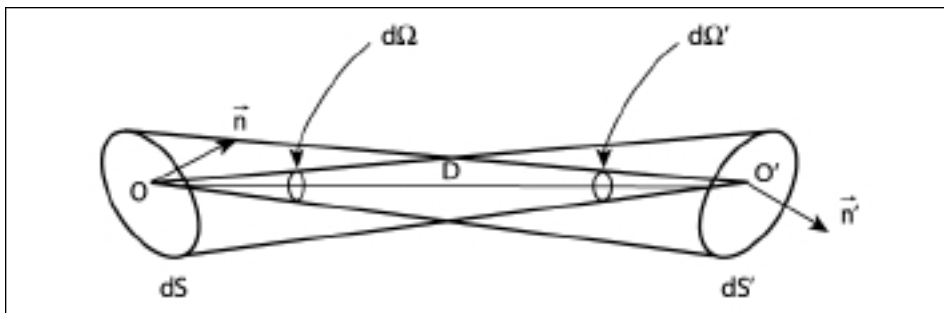


Fig.2.16. Bases graphiques de la définition de l'étendue géométrique.

Si l'on suppose les surfaces suffisamment petites, au regard de la distance qui sépare S et S' , on peut admettre que le flux émis par dS et reçu par dS' est proportionnel (coefficient de proportionnalité L) à la projection de dS dans la direction OO' , soit $\cos(\theta)dS$, et à l'angle solide $d\Omega$, c'est-à-dire l'angle solide sous lequel on voit dS' de O . La mise en relation de deux surfaces élémentaires dS et dS' justifie de noter ce flux $d^2\Phi$:

$$d^2\Phi = L \cos(\theta) dS d\Omega = L d^2G$$

La grandeur $d^2G = d\Omega.d\Omega'.D^2$ est appelée “l’étendue géométrique” du pinceau lumineux qui s’appuie sur dS et dS' . On remarquera que d^2G est symétrique par rapport à l’émission et à la réception. Par définition, le coefficient de proportionnalité L (W/m²sr) est la **luminance** (ou brillance) de la surface dS dans la direction **OO'** de coordonnées angulaires (,). Plus précisément, la luminance telle qu’elle vient d’être définie est un paramètre directionnel qui dépend des positions relatives de dS et de **OO'**. Pratiquement, l’introduction de la surface dS' n’est pas essentielle, elle ne sert qu’à définir l’angle solide $d\Omega$. En toute rigueur, on devrait écrire $L(,)$ pour désigner la puissance rayonnée par dS , par unité d’angle solide et dans une direction de coordonnées angulaires (,). Si la luminance est constante dans toutes les directions, on parle de surface lambertienne. Les surfaces lisses ont une luminance presque constante.

L’**exitance** (ou émittance) M est la puissance émise par unité de surface de la source. Elle se mesure en Wm⁻². Soit le rapport entre le flux $d\Phi$ et la surface dS . Elle peut faire l’objet des mêmes commentaires que la luminance :

$$M(,) = \frac{d\Phi}{dS} = L(,) \cos(\theta)d\Omega$$

Si la luminance est indépendante de la direction (surface lambertienne), on a $M = \pi L$.

De manière symétrique, on peut définir l’**éclairage** E d’une surface. Considérons la surface réceptrice dS' , elle reçoit un flux $d\Phi'$. On parlera d’éclairage (ou irradiance) E pour désigner le rapport $d\Phi' / dS'$. Si L' désigne la luminance de la surface dS' , on montre que :

$$E = \frac{d\Phi'}{dS'} = \pi L' \cos(\theta)$$

5.3. Les mesures

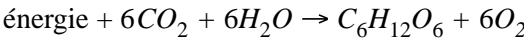
La radiométrie est la mesure de l’intensité des rayonnements, la photométrie concerne, quant à elle, les excitations visuelles. Ces deux domaines sont restés longtemps indépendants et n’ont été réunis qu’après la découverte de l’identité de nature entre la lumière et le rayonnement thermique. Ces situations ont fait coexister des systèmes de mesure particuliers dont le maintien se justifie en raison des métrologies qui sont mises en œuvre et des applications qui sont en cause.

Grandeurs	Energétique	Photonique	Lumineuse
Flux	wattW = J/s	photon/s	lumen lm = cd.sr
Intensité	W.sr ⁻¹	s ⁻¹ .sr ⁻¹	candella cd
Luminance	W.m ⁻² .sr ⁻¹	s ⁻¹ .sr ⁻¹ .m ⁻²	cd.m ⁻²
Eclairement	W.m ⁻²	s ⁻¹ .m ⁻²	lm.m ⁻²
Exitance	W.m ⁻²	s ⁻¹ .m ⁻²	lm.m ⁻²

Bien évidemment de nombreux autres systèmes sont utilisés. Chaque domaine d’application s’est forgé ses propres variables. Ainsi la météorologie utilise-t-elle le

l'angle, les astronomes différentes sortes de magnitude, les biologistes se repèrent par rapport au nombre d'oses créés.

Remarque. Ose, glucose, fructose, saccharose, et autre osides. L'ose est la chaîne carbonée élémentaire qui rentre dans la composition des glucides, il est le résultat de la réaction globale qui caractérise la photosynthèse :



L'énergie nécessaire est égale à $2,913 \times 10^6$ joules/mole et une mole contient $6,02 \times 10^{23}$ molécules (nombre d'Avogadro). Il faut donc $4,835 \times 10^{-18}$ joules pour créer un ose. Mais attention, pas sous n'importe quelle forme.

5.4. Le rayonnement solaire

5.4.1. Le rayonnement solaire 1 : l'évolution du spectre

On peut considérer que le spectre du rayonnement électromagnétique émis par le soleil couvre une gamme de longueurs d'onde qui s'étend de 0,1 mm à plusieurs kilomètres. La lumière visible ne concerne qu'une bande "étroite" de cette gamme, une bande comprise entre 400 nm et 760 nm mais qui correspond à environ 90 % de l'énergie transportée par l'ensemble du rayonnement. C'est dans cette zone du spectre du visible, et dans son voisinage, que se situe, pour une large part, le rayonnement utilisé par la végétation pour ses fonctions biologiques essentielles. Ce rayonnement est baptisé le PAR ou photosynthetically active radiation. Les appareils de mesure utilisés pour la mesure du LAI se limitent souvent à explorer le comportement du rayonnement dans cette frange du spectre.

nm	440	470	540	580	600	620
couleur	violet	bleu	vert	jaune	orange	rouge

Note : 1 nm = 10^{-3} μm = 10^{-9} m.

En deça du visible s'étend le domaine de l'ultraviolet (0,01 μm à 0,4 μm). Les ultraviolets jouent un rôle déterminant dans les réactions chimiques qui accompagnent la photosynthèse, on sait qu'ils impressionnent les films photographiques. Une grande partie des ultraviolets que nous envoie le soleil est absorbée par l'atmosphère. Au-delà du rouge, les infrarouges (0,76 μm à 500 μm) peuvent être mis en évidence par l'élévation de température qu'ils induisent. D'ailleurs, tout corps dont on élève la température par rapport à son environnement (un radiateur par exemple) émet des infrarouges. La plupart des substances transparentes au visible absorbent des infrarouges, mais de manière très sélective, c'est-à-dire pour des gammes de longueurs d'onde particulières. A titre d'exemple, considérons une serre. Le verre laisse passer les infrarouges de courtes longueurs d'onde. Le sol les absorbe, s'échauffe et, à son tour, il émet des infrarouges de longueurs d'onde supérieures à 3 μm pour lesquels le verre est opaque. La serre piège ainsi l'énergie et sa température s'élève. Quant à l'énergie transportée par les ondes du champ électromagnétique, elle est très inégalement répartie en fonction des longueurs d'onde. Le maximum d'émission est situé à environ 550 nm et correspond sensiblement à la couleur jaune, la couleur la plus perceptible. Une part importante de l'énergie est portée par les infrarouges :

Long. d'onde (nm)	290	290/400	400/700	700/4000	4000
Part d'énergie %	1	8	41	49	1

Les propriétés spectrales sont modifiées lors du passage dans l'atmosphère et lors du trajet qu'effectue la lumière dans le couvert végétal. Le tableau suivant montre les variations de la composition spectrale moyenne du rayonnement incident au sein d'un couvert végétal en fonction de l'indice foliaire (Guyot, 1997) :

LAI	0	0,5	1	1,5	2	3	4	5
vert/rouge	1,02	1,08	1,12	1,15	1,21	1,33	1,62	2,1
PAR/infrarouge	1,06	0,84	0,66	0,50	0,37	0,21	0,1	0,04

On constate que des variations importantes affectent la composition de la lumière qui traverse la végétation. D'autre part, on enregistrera que l'absorption de la végétation dans le rouge est plus importante que dans le vert. Les conséquences de ces différences de comportement sont utilisées dans le calcul des coefficients de végétation.

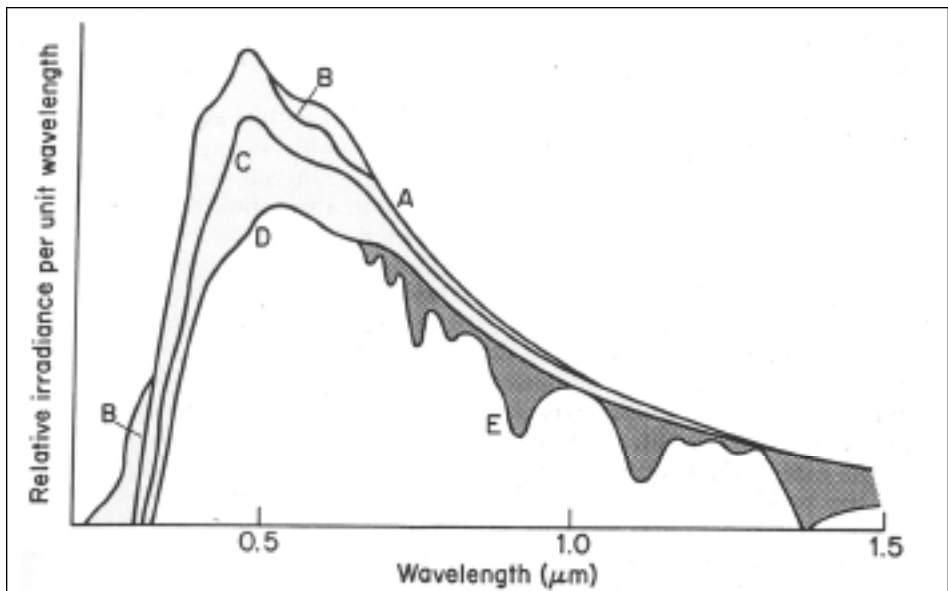


Fig.2.19. Altération du rayonnement solaire lorsqu'il pénètre l'atmosphère en fonction de la longueur d'onde. A) radiation externe ;B) après absorption par l'ozone ;C) après diffusion par les molécules en suspension (ex. : CO_2) ; D) après diffusion par les aérosols (petites particules en suspension) ; E) après absorption par la vapeur d'eau et l'oxygène (dans Montheil J.L. et Unsworth M.H., 1990).

Lors de la traversée de l'atmosphère, l'absorption, qui est due aux différents gaz présents et aux particules en suspension, s'effectue dans toutes les longueurs d'onde, mais avec des particularismes associés à la nature des obstacles et des longueurs d'onde. L'absorption par l'ozone concerne principalement les courtes longueurs d'onde (inférieures à 300 nm), l'oxygène agit sur une bande étroite centrée sur 420 nm, le dioxyde de carbone modifie deux bandes respectivement centrées sur 2750 nm et 4250 nm, mais c'est surtout l'absorption par la vapeur

d'eau qui est importante. Elle concerne les longueurs d'onde comprises entre 1000 et 2000 nm.

Lors de la modification de la structure de la lumière dans l'atmosphère, les processus d'absorption ne sont pas les seuls en cause. La diffusion (changement de direction mais aussi modification éventuelle de la longueur d'onde), qui dépend de la turbidité de l'atmosphère, joue un rôle important.

5.4.2. Le rayonnement solaire 2 : les trajectoires du soleil

Notre source de lumière principale est le soleil. A la surface terrestre, le rayonnement va dépendre de nombreux facteurs, entre autres de la position de l'astre dans le ciel. Cette position peut être repérée ou calculée. Différents repères peuvent être utilisés pour caractériser la position du soleil. Des formules permettent de passer d'un système à un autre. Ainsi si l'on note : h sa hauteur, son azimut, avec 0° pour le sud, 90° pour l'ouest..., ϕ la latitude de l'observateur et ω l'angle horaire compté en heure et fractions sexagésimales (bien qu'il s'agisse d'un angle et non d'un temps), δ la déclinaison solaire, on a :

$$\begin{aligned}\sin(h) &= \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos(\omega) \\ \sin \delta &= -\frac{\cos \phi \sin(h)}{\cos(\omega)} \\ \cos(h) \sin \omega &= -\cos \phi \sin \delta + \sin \phi \cos \delta \cos(\omega)\end{aligned}$$

L'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre par rapport au plan de l'écliptique est l'une des causes majeures de l'inégalité de la durée du jour au cours de l'année. En conséquence, les coordonnées du soleil varient au cours de l'année. Ainsi, lorsque la durée du jour est égale à celle de la nuit, la déclinaison est nulle ; elle est maximale le 21 juin et minimale le 22 décembre. On peut calculer δ en ayant recours aux formules suivantes :

$$\sin \delta = \sin(l) \sin \epsilon$$

où l est la longitude du soleil dans le plan de l'écliptique et compté à partir du point vernal.

$$\begin{aligned}l &= l_1 + g + 2e \sin(g) + \frac{5e}{4} \sin(2g) \\ e &= 0,016751 - 4,2 \cdot 10^{-7} N \\ g &= -0,0266855 - 1,658 \cdot 10^{-4} N + \frac{2}{365,25} t \\ N &= \text{millésime} - 900\end{aligned}$$

t le moment de l'année en jours et fraction du jour tandis que ϵ désigne l'obliquité de l'écliptique qui est sensiblement égale à :

$$\epsilon = 0,409319755 - 2,2711 \cdot 10^{-6} N$$

soit approximativement (j étant le jour julien) :

$$\epsilon = 0,39785 - \sin \{4,869 + 0,0172j + 0,03345 \sin(6,224 + 0,0172j)\}$$

(est égal à 0 aux équinoxes de printemps et d'automne, à $23,27^\circ$ au solstice d'été et à $-23,27^\circ$ au solstice d'hiver). On notera que la valeur de h correspondant au zénith est obtenue pour $\theta = 0$. Soit $h = \frac{\pi}{2} - (\theta - \delta)$. L'ensemble de ces outils permet de suivre la trajectoire du soleil, de placer, par rapport à cette trajectoire, les observations sur les flux d'énergie que l'on peut effectuer à un moment donné et finalement d'effectuer un bilan énergétique annuel pour une culture particulière.

5.4.3. Le rayonnement solaire 3 : l'altération du rayonnement

En dépit des fluctuations de l'activité nucléaire du soleil et des variations de la distance Terre-Soleil, l'énergie incidente qui atteint la couche supérieure de l'atmosphère peut être considérée comme constante ou presque. Mesurée, à l'extérieur de l'atmosphère, sur un plan perpendiculaire aux rayons du soleil, elle est sensiblement égale à 1370 W m^{-2} . Rapportée à la surface du sol, et en tenant compte de la sphéricité de la Terre, on obtient 350 W m^{-2} . Ces valeurs sont parfois discutées par les spécialistes. Mais d'une façon générale, la démarche est la suivante : on considère que le soleil se comporte comme un corps noir à une température d'environ $T = 5800^\circ \text{ K}$. Son exittance est donc égale à $M = \sigma T^4$ avec $\sigma = 5,67051 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$. Connaissant le rayon R_s du soleil, on peut estimer la puissance totale rayonnée, soit $M(4\pi R_s^2)$. Si l'on considère que la distance moyenne entre le soleil et la Terre est d'environ $D_{ST} = 149,5 \cdot 10^6 \text{ km}$ ($\pm 3,3 \%$) on obtient l'éclairement moyen extra-terrestre :

$$\frac{4\pi R_s^2 M}{4\pi D_{ST}^2} = 1370 \text{ W m}^{-2}$$

Voyons. Le soleil émet un flux de l'ordre de $R_c = 1370 \text{ W m}^{-2}$. Cette valeur est sensiblement constante tout au long de l'année, mais peut être corrigée pour tenir compte du caractère elliptique de l'orbite terrestre autour du soleil :

$$R_o(j) = R_c [1 + 0,034 \cos(2\pi \cdot j/365)] \quad R_o \text{ le flux au-dessus de l'atmosphère}$$

Une fois dans l'atmosphère, le rayonnement subit de nombreuses perturbations (réflexion, diffusion, absorption). Les pertes d'énergie dépendent de l'état de l'atmosphère et plus exactement d'un paramètre qui est censé en traduire la transmissivité (0,5 à 0,8). On admet que le flux après avoir traversé l'atmosphère est sensiblement égal à R_a :

$$R_a = R_o \cdot m \quad R_a \text{ le flux mesuré perpendiculairement à sa direction}$$

Le coefficient

$$m = \frac{1}{\sqrt{1229 + (614 \sin(h))^2}} - 614 \sin(h)$$

baptisé "distance optique relative" prend en compte la non-rectitude de la transmission de la lumière du soleil vers la surface terrestre. Le rayonnement direct, que l'on peut mesurer au-dessus du couvert et qui passe pour partie au travers des trouées, est égal à $R_o \sin(h)$.

Au-delà du rayonnement direct que nous venons d'évoquer, il convient de tenir compte du rayonnement indirect (diffus). Plusieurs propositions ont été faites par les spécialistes qui distinguent généralement les ciels clairs (faible diffusion atmosphérique) des ciels couverts (forte diffusion atmosphérique).

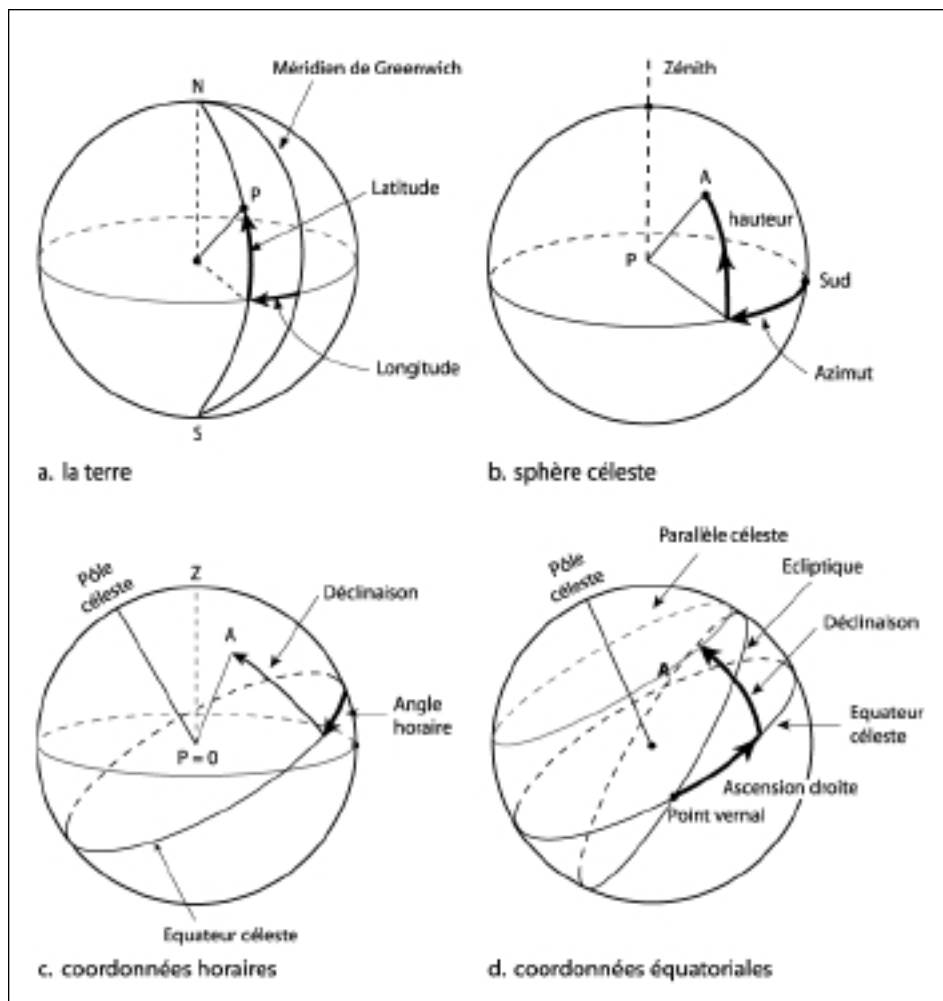


Fig.2.20. Bases de la caractérisation de la position relative du soleil à partir des coordonnées angulaires.

a. La position d'un individu situé en un point M sur la Terre est déterminée par sa longitude (angle entre le méridien de M et le méridien de Greenwich) et sa latitude (angle entre la verticale en M et le plan de l'équateur).

b. La position d'un astre A , vu de M , est déterminée par son azimut et sa hauteur h . Ces coordonnées sont mesurées dans un système construit autour du plan horizontal et de la verticale en M . La sphère sur laquelle on positionne A est dite la sphère locale.

c. Par suite de la rotation de la Terre, au cours de la journée, A se déplace par rapport à M . Pour caractériser ce déplacement apparent, on se réfère à une sphère, dite céleste, en rotation autour de l'axe du monde (axe de rotation de la Terre). Sur cette sphère, A est repéré par l'angle horaire (défini par rapport au méridien de la sphère céleste qui passe par les pôles et le zénith en M) et la déclinaison. *Remarque* : si la déclinaison de A est indépendante de M , il n'en est pas de même de l'angle horaire.

d. Le plan de référence est toujours le plan de l'équateur céleste. L'ascension droite A_d remplace l'angle horaire. L'ascension droite est mesurée par rapport à un point fixe, le point vernal, qui est situé à l'intersection entre l'équateur et le plan de l'écliptique (plan de la rotation de la Terre autour du soleil). On a $\alpha = T_s - A_d$ où T_s est l'angle horaire du point vernal (par rapport au méridien de Greenwich) et α la longitude de l'observateur.

Pour un ciel clair, la distribution du rayonnement diffus n'est pas homogène. En effet, on observe que les portions de ciel proches du soleil sont plus lumineuses que celles situées sur l'orthogonale de cette position (de 4 à 10 fois plus importantes). Une formule approchée permet d'évaluer la part totale diffusée en fonction de la transmissivité τ et de la hauteur du soleil h :

$$R_d = R_o(0,271 - 0,294\tau^m) \sin(h)$$

Mais cette formule ne donne pas d'éléments pour distribuer spatialement le flux. En présence d'un ciel couvert, on fait souvent l'hypothèse que la répartition est uniforme. Soit pour une direction D :

$$R_D = R_d /$$

D'une façon plus générale, on peut supputer une loi de répartition qui s'ajuste aux variations les plus visibles. Exemple : le rayonnement diffus dans la direction de hauteur h peut être approché par la formule suivante (cette formule dite "standart overcast sky" ou loi de Moon et Spencer est utilisable par ciel clair ou couvert) :

$$R_d(h) = R_d(h_z) (1 + 2\sin(h))/3 \quad h_z \text{ l'angle qui correspond au zénith}$$

Les indices d'éclairement relatif ou "sites factors". Considérons un couvert végétal particulier : soit une forêt. Les praticiens définissent des indices qui évaluent les proportions de rayonnement, direct ou diffus, qui sont transmises en un point donné situé en-dessous du couvert. Ces indices (direct site factor et indirect site factor) varient entre 0 et 1. Le complément à 1 correspond à la proportion de rayonnement interceptée.

5.5. Les rencontres

Gardons en mémoire un principe important : dans un milieu inerte, tous les corps rayonnent, c'est-à-dire qu'ils perdent continuellement de l'énergie. Pour maintenir leur température, ils doivent compenser les pertes en absorbant l'énergie qui leur est fournie par les sources (les corps) qui les entourent. C'est cette dualité émetteur et récepteur que nous avons abordée indirectement dans le précédent paragraphe. Toutefois, dans les milieux biologiques, une part de l'énergie est utilisée pour assurer des fonctions vitales, comme la photosynthèse, ce qui rend plus délicate l'élaboration des bilans énergétiques.

Considérons un obstacle O , de dimensions finies, sur lequel vient percuter un faisceau lumineux. Selon ce qui vient d'être dit, on observe, éventuellement, de la réflexion, de la transmission (réfraction non absorbée) et de l'absorption. Les deux premiers phénomènes pouvant s'accompagner de diffusion.

Si I_0 désigne le flux incident atteignant le corps O , on peut donc enregistrer sa décomposition en I_A , I_R et I_τ correspondant respectivement aux flux absorbés, réfléchis et transmis. L'importance relative de ces flux dépend des longueurs d'ondes considérées et de la nature du corps. On définit trois coefficients $\alpha = I_A / I_0$, $\rho = I_R / I_0$ et $\tau = I_\tau / I_0$ dits respectivement d'absorption, de réflexion et de transmission. L'expérience montre que ces coefficients ne dépendent pas de la

valeur du flux, mais uniquement du milieu et de la composition spectrale de la lumière. On a :

$$\rho + \tau = 1$$

L'énergie réfléchie a fait l'objet de nombreuses études dans la mesure où elle est essentielle à l'accès des fonctions aussi élémentaires que la vision, mais aussi parce que son importance conditionne les autres fonctions d'absorption et de transmission. La fraction du rayonnement solaire réfléchi par un milieu donné est baptisée **albédo**. C'est une notion spectrale, c'est-à-dire qui dépend de la longueur d'onde. La détermination de l'albédo renseigne sur les potentialités climatique et biologique d'un milieu particulier. A titre d'information, mais avec prudence, tant les estimations varient, citons quelques chiffres-repères :

milieu :	corps noir	forêt	sol nu sec	sol nu humide	neige	glacier
albédo	≈ 0	≈ 0,2	≈ 0,4	≈ 0,3	≈ 0,8	≈ 0,5

L'albédo de la forêt n'est pas très élevé, mais l'énergie que la forêt prélève pour sa croissance et son fonctionnement lui permet d'assurer une faible transmission donc une bonne protection des sols.

6. Le bilan radiatif et l'ambiance lumineuse en forêt

6.1. Principes généraux des bilans radiatifs

Historiquement, le terme de rayonnement était associé à des phénomènes de propagation pour lesquels la nature des rayons en cause était inconnue. Actuellement, il désigne plus spécifiquement un flux de particules. On distingue, entre autres :

Le rayonnement thermique. Tout corps maintenu à une température constante émet de l'énergie sous forme de rayonnement thermique qui correspond à des longueurs d'onde comprises entre l'infrarouge et l'ultraviolet. Sa composition dépend de la température du corps. Pour un corps noir, elle est proportionnelle à T^4 .

Le rayonnement calorifique. Il s'agit essentiellement de l'ancienne dénomination des infrarouges.

Le rayonnement PAR. Le rayonnement solaire utilisé par la photosynthèse est situé dans la bande spectrale dite du visible (400 et 700 nm). Seule 20 % de l'énergie associée à cette bande est mobilisée par la photosynthèse. Il s'agit du "rayonnement" ou "éclairage utile" : le PAR (photosynthetically active radiation). Il est exprimé en énergie radiative (E_{PAR} mesurée en $W\ m^{-2}$) ou en nombre de photons (Q_{PAR} mesuré en $mol\ m^{-2}/jour$). On l'estime compris au niveau du sol, et selon l'exposition, entre 17500 et 35000 $mW\ m^{-2}$. Le PAR est porté par un rayonnement incident direct et un rayonnement diffus (pas de direction privilégiée mais une répartition multidirectionnelle qui peut être hétérogène).

Au niveau du système sol-végétation, le bilan radiatif est établi en comptabilisant le flux incident entrant R_o (direct et diffus), le flux incident intercepté par la végétation R_{av} , le flux réfléchi par le sol R_s et intercepté par la végétation, le flux absorbé par le sol R_s et le flux réfléchi dans l'atmosphère par le système sol-végétation R_{sv} . Ces bilans peuvent être comptabilisés dans des intervalles de longueurs d'onde particuliers (le *PAR*, le rayonnement thermique, l'infrarouge, ...).

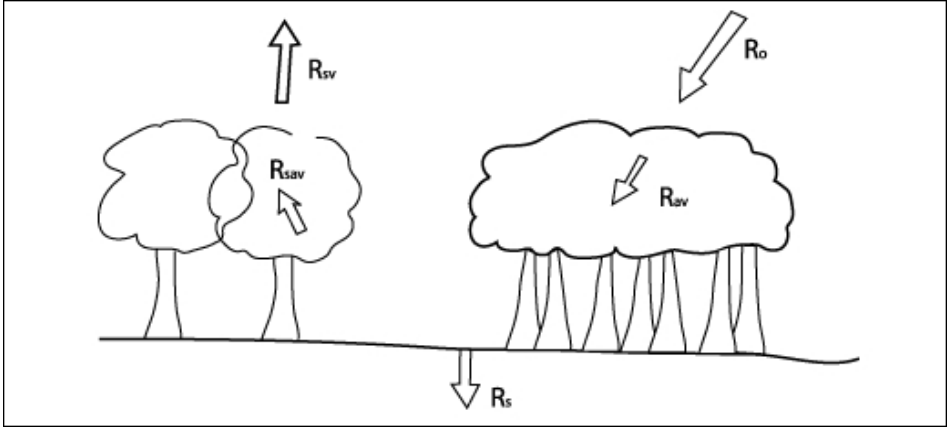


Fig. 2.21. Les termes du bilan radiatif dans le système atmosphère, végétation et sol. $R_{av} + R_{sav} = R_o - R_s - R_{sv}$.

Les termes R_{sav} et R_{sv} sont souvent négligés et dans ces conditions l'énergie absorbée est égale à l'énergie interceptée sur le flux incident. Cette énergie est alors évaluée par l'écart entre les rayonnements mesurés au-dessus du couvert et au sol. Cette approximation est fréquemment utilisée lors des mesures faites à partir du sol. Elle revient à assimiler le sol et les feuilles à des corps noirs.

6.2. Interception du flux incident

Rappel. Le flux entrant est composé d'un flux direct en provenance du soleil et de direction D_s caractérisé par ses coordonnées angulaires (h_s, ϕ_s), et d'un flux diffus. D'autre part on considère que le couvert est organisé selon le gradient associé à l'indice foliaire $L(z)$, avec L (sommet du couvert) = 0 et L (au sol) = LAI .

Au niveau L , le rayonnement direct R_{DL} présent est proportionnel à la fraction de trouées $P(D_s, L)$ et si R_{D0} mesure la valeur du flux direct au-dessus de la canopée, R_{DL} a pour valeur

$$R_{DL} = R_{D0} \cdot P(D_s, L)$$

Si, à ce même niveau, on désigne par S_L la surface foliaire éclairée par le rayonnement direct, on peut considérer qu'elle est complémentaire de la fraction de trouées et écrire :

$$1 - P(D_s, L) = \frac{G(h_s, \phi_s)}{\sin(h_s)} S_L$$

On en déduit l'expression de la part de flux direct reçue au niveau L par unité de surface éclairée :

$$R_D - R_{DL} = R_D(1 - P(\mathbf{D}_s, L))$$

En ce qui concerne le rayonnement diffus et, dans la mesure où il n'y a pas de direction privilégiée, pour chaque direction particulière, la valeur du rayonnement diffus qui atteint le niveau L , soit R_{dL} , est proportionnelle à la fraction de trouées et à l'intensité du rayonnement. Sur l'ensemble de l'hémisphère, le rayonnement cumulé ne peut être obtenu qu'en intégrant les valeurs associées à toutes les directions \mathbf{D} . Pour ce faire, il faut connaître la répartition du rayonnement diffus, c'est-à-dire la fonction de densité de la luminance $L_s(\mathbf{D})$ du ciel :

$$R_{dL} = \int_{\mathbf{D}} L(\mathbf{D}) P(\mathbf{D}, L) \sin(h) d(\mathbf{D}) \quad \text{avec } h \text{ la hauteur de } \mathbf{D} \quad (2)$$

$R_{DL} + R_{dL}$ est le rayonnement total qui atteint le niveau L

Connaissant cette valeur pour $L = 0$ et pour $L = LAI$, on obtient par différence l'énergie absorbée par le couvert.

Remarque. En effectuant des mesures en forêt et hors forêt (ces dernières remplacent les mesures au-dessus du couvert) on peut établir le bilan et en déduire l'énergie absorbée et la valeur de l'indice foliaire. La difficulté est d'obtenir une évaluation ou une modélisation de $L(\mathbf{D})$. Si le ciel est clair, la distribution du rayonnement diffus n'est pas uniforme mais dépend de la portion hémisphérique considérée. On rappelle que les portions de la voûte céleste proches du soleil sont 4 à 10 fois plus lumineuses que celles situées à 90° dans le plan vertical constitué par la direction du soleil \mathbf{D}_s et son zénith.

Conclusion

La connaissance des lois qui régissent les interférences entre un rayonnement lumineux de direction donnée et le couvert, qu'il s'agisse de la distribution de trouées ou du nombre de contacts, est essentiellement une connaissance de nature géométrique. Elle permet d'approcher, avec l'aide de quelques hypothèses, souvent contraignantes, la distribution et l'organisation du couvert, donc d'estimer la densité foliaire, sa répartition spatiale et de suivre son évolution temporelle. En ce sens, l'accent est mis sur la structure du couvert. Par contre, le comportement de la lumière qui va interférer avec l'image qui nous parvient à partir de laquelle nous construisons nos calculs n'est pas intégrée à l'analyse. Rien n'est dit sur la disponibilité de l'énergie lumineuse.

L'approche par le bilan radiatif rejoint les préoccupations qui motivaient la démarche plus géométrique de la méthode des trouées. Aussi, le bilan radiatif permet-il l'estimation du LAI et de la répartition angulaire des feuilles. Mais, il y a un "plus". Elle informe sur la répartition du rayonnement au sein du couvert, donc partiellement elle renseigne sur le moteur énergétique. Toutefois, ce "plus" a ses limites. D'une part, on est contraint par les difficultés de calcul, d'autre part, on n'a pas accès au fonctionnement d'un organe particulier. Quant à la pertinence de la théorie et l'opérationnalité des métrologies associées, elles restent, pour beaucoup, tributaires de considérations globales sur le peuplement étudié.

Chapitre 3

Méthodes d'estimation de l'indice foliaire et autres paramètres de structures dans les couverts forestiers

Introduction

De nombreuses publications proposent des synthèses des différentes méthodes d'estimation des paramètres de structure de la végétation, en particulier les travaux de Ross (1981), Norman et Campbell (1989), Daughtry (1990) et Welles (1990). On distingue classiquement deux catégories de méthodes :

1 • Les méthodes dites “directes” ou semi-directes, parce qu’elles concernent réellement une mesure de surface foliaire : par planimétrie des feuilles (Delta-T, Li-Cor, CID), à partir de figures géométriques similaires (Niinemets et Kull, 1994) ou à l’aide d’équations combinant les dimensions linéaires de la feuille et un facteur de correction de forme (Ross, 1981). La mesure de surface foliaire est souvent réalisée sur un sous-échantillon, puis la surface foliaire est convertie en poids sec. Ensuite, il suffit de peser les feuilles sèches et de reconvertir ce poids sec en surface. Cette méthode présente l’avantage d’être beaucoup plus rapide qu’une mesure directe de la totalité de la surface. Si nécessaire, l’orientation et l’inclinaison foliaire peuvent être déterminées sur l’arbre en place (Lang, 1990). Les méthodes directes sont les seules qui donnent réellement accès à l’indice foliaire au sens strict. Elles servent de référence. Elles permettent aussi d’analyser séparément les caractéristiques de forme, dimensions et nombre de feuilles. Elles sont peu onéreuses en matériel mais sont assez longues à mettre en œuvre, surtout si un tri des feuilles par espèce est réalisé. Cette dernière opération offre toutefois l’avantage de pouvoir accéder à la contribution respective des différentes espèces du couvert. Leur plus grande difficulté consiste en l’échantillonnage des feuilles sur lesquelles sont réalisées les mesures de surface foliaire, afin de bien prendre en compte l’hétérogénéité des caractéristiques foliaires liée entre autres à la structure du couvert.

Les méthodes directes ou semi-directes, présentées dans la suite de ce travail, sont les suivantes : la collecte de litière, la méthode de l’aiguille et les méthodes allométriques.

2 • Les méthodes dites “indirectes” exploitent les relations entre les paramètres de structure et les fractions de trouées dans le couvert et/ou le nombre de contacts entre une sonde de direction donnée et le couvert. Ici, aucune mesure de surface foliaire n’est réalisée. C’est essentiellement leur rapidité et leur apparente facilité d’utilisation qui sont à l’origine de l’intérêt croissant accordé à ces méthodes optiques. Elles reposent sur une approche probabiliste et statistique de la distribution des éléments foliaires dans le couvert et utilisent des équations,

relativement complexes, basées sur de nombreuses hypothèses. Outre les hypothèses propres aux méthodes de calcul, d'autres hypothèses relatives aux techniques ont été introduites. On retiendra qu'afin de mieux cerner les conditions d'acquisition et de juger de la validité des estimations fournies par ces techniques, il est nécessaire de bien garder à l'esprit les fondements théoriques à l'origine des relations entre les paramètres de structure et les fractions de trouées et/ou le nombre de contacts.

Bien qu'initialement développées pour des couverts agronomiques, relativement homogènes et uniformes, ces pratiques ont été étendues à l'étude des couverts forestiers. Elles ne sont pas destructives, mais restent peu ou mal adaptées à une utilisation en forêt. La prise de données sur le terrain est rapide et souvent simple, même si elle nécessite certaines précautions. Le traitement des données acquises permet le calcul rapide d'autres paramètres descriptifs de la structure du couvert que l'indice foliaire (fractions de trouées, distribution des angles foliaires et angle foliaire moyen, etc.). Certaines informations dérivées de ces paramètres sont utiles dans d'autres domaines, tel que la télédétection et la climatologie.

1. Méthodes directes

1.1. Recueil de litière

Dans le cas des essences feuillues caducifoliées, l'indice foliaire retourne au sol à la fin de chaque saison, ce qui donne accès facilement et à moindre coût à ce paramètre et à sa dynamique de diminution depuis la valeur maximale. Effectué correctement, le recueil de litière constitue, par excellence, la méthode de référence. Evidemment, cette méthode ne donne pas accès aux informations relatives à l'ouverture du couvert ou à la distribution des angles foliaires mais fournit directement un indice foliaire partiel à la date de la récolte. L'indice foliaire total est déterminé après la chute totale des feuilles en cumulant les indices foliaires partiels. Notons toutefois que, dans le cas de peuplements résineux ou feuillus sempervirens, cette méthode donne accès à la seule fraction renouvelée de l'indice foliaire.

La récolte de litières consiste à recueillir les feuilles dans des bacs disposés au sein du peuplement pendant la période de chute foliaire. Cette technique a été utilisée dans de nombreux travaux mais selon des protocoles assez variables. Les différences les plus fréquentes concernent la taille et la forme des bacs, leur densité (nombre en fonction de la surface du peuplement), leur disposition, la fréquence des récoltes et les conditions de séchage. S'il n'existe pas de protocole normalisé pour mettre en œuvre des collectes de litières foliaires, la démarche générale est telle que décrite dans les pages suivantes.

Des bacs, d'une surface unitaire connue et variant généralement de 0,20 à 1 m² et de forme variable (circulaire, carrée, rectangulaire), si possible avec drainage de l'eau de pluie, sont disposés (à une hauteur variable du sol) en nombre suffisant dans le peuplement selon les objectifs visés (4-5 bacs/ha pour Burton et al., 1991 ; 60 bacs/ha pour Vose et al., 1995 ; 140 bacs/ha pour Bréda et al., 1995). L'effet des

dimensions (surface et hauteur des rebords) et de la densité des collecteurs sur la biomasse de litière récoltée a été étudié par Morrison (1991) dans une forêt d'érables à sucre et par Mc Shane *et al.* (1983) dans un peuplement mixte de Douglas et Tsuga. Morrison conclut à un effet significatif de la hauteur du rebord et de la surface. Des bacs de petite taille et placés près du sol accumulent plus de litières. Sur trois années de récolte, l'auteur a calculé que 6 à 14 bacs/ha peuvent constituer une densité d'échantillonnage satisfaisante. Il est clair toutefois que les conclusions de telles études sont très dépendantes des conditions locales, climatiques, topographique (Welbourn *et al.*, 1981) et des espèces présentes dans le peuplement.

Les litières sont récoltées périodiquement (fréquence hebdomadaire à mensuelle), triées afin de ne conserver que les échantillons foliaires, puis séchées à l'étuve (24 à 48 h à une température comprise entre 60 et 105° C). On accède ainsi à une biomasse foliaire sèche (kg) qu'on rapporte à l'unité de surface échantillonnée (m²) correspondant à la surface totale des bacs. L'indice foliaire est alors déterminé en multipliant la biomasse sèche de feuilles par un coefficient appelé "surface spécifique" (exprimé en m²/kg ou cm²/g). La surface spécifique est établie sur un sous-échantillon de feuilles de litière fraîchement récoltées. La surface foliaire de cet échantillon est déterminée par planimétrie des feuilles, en distinguant chaque espèce présente. Le poids sec des feuilles du sous-échantillon est déterminé après passage à l'étuve dans les mêmes conditions que l'ensemble de la biomasse récoltée. La surface spécifique exprime donc une surface par unité de poids sec. L'indice foliaire maximum du couvert est obtenu en cumulant, après la chute totale des feuilles, les indices foliaires partiels obtenus espèce par espèce après chaque récolte. L'analyse récolte par récolte permet de décrire la cinétique de diminution de l'indice foliaire, et le tri des feuilles permet de distinguer la contribution de chaque espèce à l'indice foliaire total. A titre d'illustration, le tableau 3.1 donne quelques valeurs de la surface spécifique de litières pour quelques espèces forestières :

La surface spécifique est une grandeur dynamique et propre à chaque peuplement car elle dépend, entre autres, des conditions stationnelles et de la composition en espèces. Pour le même peuplement, la surface spécifique des litières peut varier selon la date de récolte pour la même année de végétation, et d'une année à une autre en fonction des conditions climatiques, de l'état sanitaire des arbres, de la sylviculture, etc.

La démarche la plus rigoureuse pour déterminer l'indice foliaire à partir des récoltes de feuilles consiste : (1) à collecter la litière au fur et à mesure de sa chute, afin d'éviter un début de dégradation ou de lessivage des feuilles ; (2) à déterminer la surface spécifique à chaque collecte et pour chaque espèce ; (3) à convertir la biomasse partielle (par date et par espèce) en indice foliaire partiel. L'indice foliaire du couvert est déterminé en cumulant les indices foliaires partiels.

Enfin, signalons que de telles récoltes de litières sont parfois réalisées dans l'objectif de quantifier les "retombées" de litières en biomasse seulement (par exemple dans le cadre du réseau européen de surveillance des forêts, dont RENECOFOR¹).

¹ Réseau National de suivi à long terme des ÉCOsystèmes fORestiers.

Tab. 3.1. Surface spécifique (cm² . g⁻¹ du poids sec) pour quelques espèces forestières.

Peuplements	Caractéristiques dendrométriques	Surface spécifique (cm ² .g-1)	Localisation	Références
Hêtraie à mull calcique	100-150 ans	213	Lorraine belge	Vanseveren et Herbauts, 1977
Hêtraie à mull mésotrophe		195		
Hêtraie-chênaie à mull mésotrophe		210		
Hêtraie à mull oligotrophe		205		
Hêtraie-chênaie à mull oligotrophe		243		
Hêtraie à mull moder		216		
Hêtraie à moder		211		
Chênaie-hêtraie à moder-mor		225		
Chênaie-hêtraie à moder-mor		223		
Chênaie à moder-mor		232		
Hêtre		256	Caroline, USA	Chason <i>et al.</i> , 1991
<i>Nyssa sylvatica</i>		138		
<i>Quercus velutina</i>		110		
<i>Quercus prinus L.</i>		121		
<i>Cornus florida L.</i>		155		
<i>Carya tomentoasa</i>		120		
Chêne rouge		100		
<i>Diospyros virginiana</i>		166		
Erable à sucre		165		
<i>Liriodendron tulipifera L.</i>		134		
<i>Quercus alba</i>		103		
Erable à sucre (90% de la surface terrière totale)	78 ans, 20 m, 31 m ² /ha	233 (1989) 201 (1990)	Région du grand lac (Amérique du Nord)	Burton <i>et al.</i> (1991)
Erable à sucre (86 % de la surface terrière totale)	79 ans, 24 m, 32 m ² /ha	185 (1989) 222 (1990)		
Erable à sucre (86 % de la surface terrière totale)	73 ans, 27 m, 30 m ² /ha	196 (1989) 164 (1990)		
Erable à sucre (83% de la surface terrière totale)	74 ans, 28 m, 30 m ² /ha	188 (1989) 190 (1990)		
Erable à sucre (75% de la surface terrière totale)	78 ans, 24 m, 30 m ² /ha	194 (1989) 191 (1990)		

Dans ce cas, la détermination de la surface spécifique n'est pas nécessaire et seule une pesée après séchage est réalisée : les résultats sont exprimés en masse de feuilles sèches par unité de surface au sol. Mais il faut savoir qu'à la même biomasse foliaire peuvent correspondre des surfaces, donc des indices foliaires, différents.

Une récente enquête réalisée pour la Commission européenne dans le cadre de l'ICP Forests² (Bréda et Landmann, 2002) et présentée lors de la première réunion du *ad hoc Expert Group on Litterfall* (Fontainebleau, 5-6 mars 2001) a permis de recenser les protocoles de collecte de litière mis en œuvre dans 19 pays européens participant au réseau de surveillance de l'état sanitaire des forêts.

Trente-deux protocoles ont été analysés. Le nombre moyen de collecteurs est de 33 coll./ha. Les bacs sont le plus souvent dispersés selon un échantillonnage systématique, positionnés entre 80 cm et 150 cm du sol. Ils sont pourvus d'un matériel drainant ou perforé. La surface collectrice d'un bac est en moyenne de 0,45 m², mais peut atteindre 1 m². Notons aussi que seulement 4 protocoles sur 32 utilisent les biomasses de feuilles pour calculer l'indice foliaire. Par ailleurs, le protocole mis en œuvre dans le cadre du programme FORCAST³ pour étudier la production de litière est le suivant : 24-25 collecteurs/ha de 0,5 m² et distants de 10 m par site, maille drainante de 2 mm x 2 mm (hêtre) ou 770 µm x 270 µm (résineux). Les collectes sont mensuelles ou bimensuelles (période de forte chute foliaire) (Cotrufo, communication personnelle).

1.2. Méthodes allométriques

Ces méthodes utilisent la mesure de variables corrélées à la surface foliaire mais plus simples d'accès (diamètre, surface terrière du tronc ou surface du bois d'aubier, par exemple). Ces relations entre surface terrière et surface foliaire sont établies sur un échantillon d'arbres répartis dans tout l'histogramme de distribution des tiges du peuplement (en surface terrière ou, mieux, en surface d'aubier). Les arbres sélectionnés sont ensuite abattus, la circonférence et la largeur d'aubier sont mesurées à 1,30 m du sol ou à la base de la couronne vivante. Sur chaque arbre, la biomasse foliaire totale est récoltée, et des échantillons sont prélevés pour déterminer la surface spécifique des feuilles. La surface foliaire totale de chaque arbre est alors obtenue en multipliant le poids sec de toutes les feuilles de l'arbre par la surface spécifique. Sur l'échantillon d'arbres considéré, les surfaces foliaires individuelles ainsi déterminées sont mises en relation avec les surfaces d'aubier ou les diamètres du tronc correspondants. Une régression surface foliaire/surface d'aubier ou diamètre du tronc est calculée et elle permet de prédire la surface foliaire d'un arbre de diamètre connu. L'indice foliaire du peuplement est obtenu en appliquant cette relation à l'ensemble des tiges dans le peuplement. Un inventaire précis est donc nécessaire et le choix de l'échantillon d'arbres, utilisé pour établir la relation surface foliaire/surface d'aubier, est important. Même s'il n'existe pas de protocole normalisé, les arbres sélectionnés doivent se répartir dans toute la gamme de tailles d'arbres présents dans le peuplement. En cas de

² ICP Forest : International Co-Operative Programme on Assessment and Monitoring of Air Pollution Effects on Forests.

³ Forest Carbon - Nitrogen Trajectories.

peuplement mélangé, cette condition doit être remplie pour toutes les espèces présentes (au moins dans l'étage dominant). A titre d'exemple, Burton *et al.* (1991), dans des peuplements d'érable, sélectionnent 8 arbres par site (5 à 6 ha) et considèrent des classes de diamètre de 10 cm d'étendue.

Au sein d'une même espèce, il existe de fortes variations de la surface spécifique entre arbres. Ces variations dépendent du statut et des conditions de croissance. Il importe pour cette raison d'établir une surface spécifique pour chaque catégorie de diamètre échantillonnée. De plus, on enregistre aussi des différences importantes de surface spécifique au sein du houppier de chaque arbre : variation verticale surtout, azimutale parfois, ou encore selon l'âge du verticille et des aiguilles chez les résineux. Ainsi, les feuilles situées au sommet du couvert reçoivent plus de lumière et sont physiologiquement plus actives (Woodman, 1971). Elles sont plus épaisses que les feuilles d'ombre et présentent une surface spécifique plus faible (Aussenac et Ducrey, 1977). La figure 3.1 illustre la variation de la surface spécifique en fonction de la hauteur dans un couvert forestier. Cette variabilité est à prendre en compte au moment du prélèvement des feuilles au sein de chaque arbre.

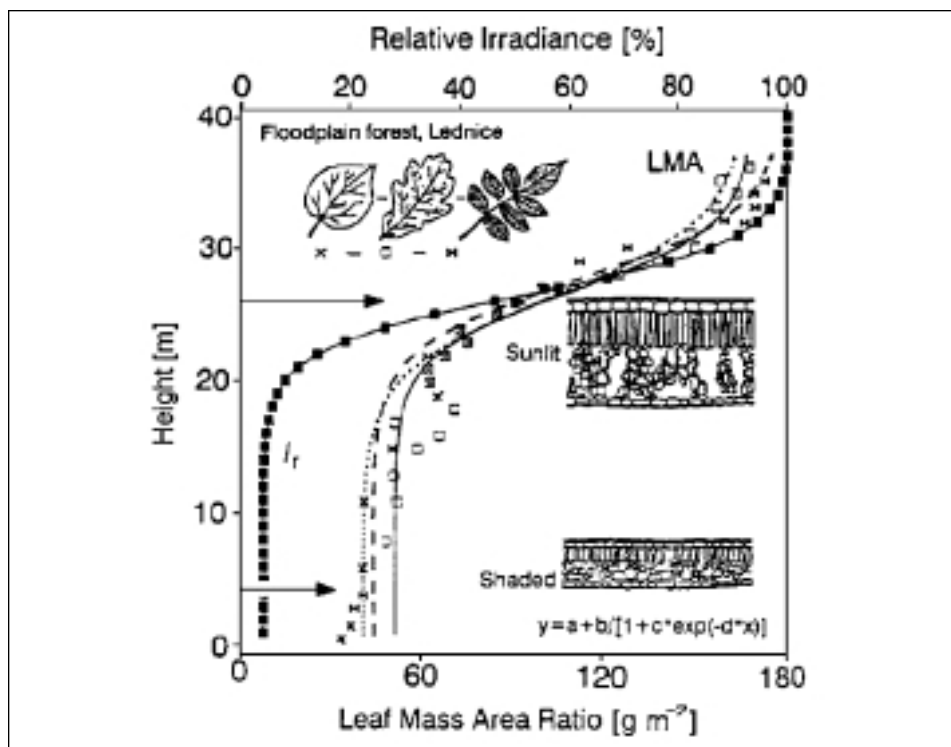


Fig. 3.1. Variation de la masse spécifique (Leaf mass area ratio, g.m⁻²) en fonction de la hauteur dans le couvert (Eermak, 1998).

Bien évidemment, la surface spécifique est dépendante de l'espèce. Ainsi, Niinemets et Kull (1994) ont déterminé la surface spécifique et la surface foliaire moyenne sur 80 espèces (arbres, arbustes et arbrisseaux) tempérées. Le tableau 3.2 reprend quelques résultats de ce travail.

Tab. 3.2. Caractéristiques foliaires de quelques espèces tempérées (Estonie) (Niinemets et Kull, 1994).

Espèces	TC moyen	Hauteur (m)	MS (g.m ⁻²)	ΔMS (%)	SF (cm ²)	SF (%)
Bouleau pubescent (<i>Betula pubescens</i>)	0,63	8,3	63	10,4	8,9	-1,1
Frêne commun (<i>Fraxinus excelsior</i>)	0,50	10,2	83,3	-8,4	9,3	-4,4
Peuplier tremble (<i>Populus tremula</i>)	0,5	16	86,7	7,5	28,1	7,2
Chêne pédonculé (<i>Quercus robur</i>)	0,57	17,7	60,7	3,2	24,4	-9,9
Bourdaïne (<i>Frangula alnus</i>)	0,60	2,27	26,1	27,5	15,6	18,3
saule blanc (<i>Salix alba</i>)	0,45	13,3	99	-8,1	5,3	2,0
Aulne glutineux (<i>Alnus glutinosa</i>)	0,23	3,30	77,4	31,9	8,45	-32,0
Tilleul à petites feuilles (<i>Tilia cordata</i>)	0,70	8,0	25,5	18,1	26,3	12,5

TC : taux du couvert sur le plan horizontal (estimé visuellement). MS : masse spécifique (mesurée après séchage à l'étuve à 90°C pendant 48 heures). $\Delta MS (\%) = [MS (\text{tiers supérieur du couvert}) - MS (\text{tiers inférieur du couvert})] \cdot 100 / [MS (\text{tiers supérieur})]$. Lorsque $\Delta MS (\%) > 0$, la masse spécifique des feuilles du tiers supérieur du couvert est supérieure à celle des feuilles du tiers inférieur. SF est la surface foliaire moyenne (une seule face). $\Delta SF (\%)$ est calculé de la même manière que $\Delta MS (\%)$.

On peut noter que $\Delta MS (\%)$ est le plus souvent positif, exprimant des masses spécifiques plus élevées en haut qu'en bas du couvert. Les écarts maximum sont observés pour la bourdaïne et l'aulne glutineux.

L'établissement de relations allométriques est une opération délicate et doit respecter des contraintes d'échantillonnage strictes. Celles-ci sont dépendantes du peuplement étudié et toute extrapolation de cette relation à un autre peuplement est une source d'erreurs potentielle. Grier *et al.* (1984) montrent qu'on peut enregistrer des écarts allant de -5 % à 100 % sur l'estimation de l'indice foliaire, suite à l'application d'une relation allométrique inadaptée.

Pour une espèce donnée, les relations allométriques sont dépendantes des conditions de fertilité, de climat, de sylviculture du peuplement (densité, surface terrière). Cette sensibilité est illustrée dans le travail de Alberkston (1984), qui a établi des relations allométriques sur 16 peuplements de pin sylvestre (9 à 145 ans, 412 à 3 459 arbres/ha). Les relations calculées pour chaque peuplement sont hautement significatives mais présentent des variations importantes d'un site à l'autre. Le tableau 3.3 reprend quelques résultats de ce travail.

Tab. 3.3. Relations allométriques ($BS = a W + b$) entre la biomasse sèche des aiguilles (BS en g) et la surface du bois d'aubier à 1,3 m du sol (W en cm^2), établies dans des peuplements de pin sylvestre (*Pinus sylvestris* L.), N étant le nombre d'arbres abattus et échantillonnés par site. Tous les sites sont situés au centre de la Suède (10-300 m d'altitude, température moyenne de 4°C et précipitation moyenne de 600 mm an⁻¹) (d'après Albrekston, 1984).

Site	Age (ans)	H(m)	Densité (arbres/ha)	G (m^2/ha)	a	b	R ²	N
11	28	13,4	3 102	30	40,3	- 683	0,951	10
12	14	7,7	2 538	15	33,5	84	0,801	10
13	50	14,8	1 775	23	19,5	474	0,871	10
14	100	19,2	453	20	31,3	- 631	0,933	10
15-A	13	5,5	1 131	8	54,8	319	0,925	15
16	145	24,8	1 457	17	25,3	987	0,809	15

Ces résultats montrent des corrélations hautement significatives au niveau de chaque site. La régression équivalente pour l'ensemble des 16 sites est au contraire statistiquement non significative, illustrant ici un fort effet milieu, sylviculture et âge.

De nombreux autres travaux ont permis de mettre en évidence l'effet de la sylviculture sur les relations allométriques. Dans des peuplements de sapin Douglas (Vancouver, Colombie britannique), Smith (1993) a proposé une relation entre la surface foliaire par arbre, le diamètre du tronc à 1,3 m du sol et la densité. Cette relation montre que, pour un même diamètre, les sites les plus denses présentent une surface foliaire par arbre plus faible. Pearson *et al.* (1984) ont abouti à des conclusions similaires et montrent que la surface foliaire par unité de surface de bois d'aubier est plus élevée dans les sites les plus âgés et de faible densité. Elle est plus basse dans les sites les plus denses. Les effets de la densité sur les relations allométriques ont été aussi abordés par Makela *et al.* (1995) dans des peuplements de pin sylvestre. Ils aboutissent aux mêmes conclusions que Albrekston (1984) (tab. 3.3) : les relations établies sont hautement significatives sur chaque site mais différentes d'un site à l'autre. Ces effets de la densité peuvent aussi s'analyser selon le statut social des arbres dans le peuplement. Ainsi, Shelbrune *et al.* (1993) ont obtenu des relations allométriques significatives sur les arbres dominants. Ce qui n'est pas le cas lorsqu'on s'intéresse aux arbres surcimés.

D'autres travaux cherchant à déterminer les effets de la richesse du milieu sur les relations allométriques ont conduit à des interprétations délicates. Dans des peuplements de pin à encens, Shelbrune *et al.* (1993) ont montré que la richesse du milieu n'avait pas d'effet visible sur la nature des régressions établies et que c'était essentiellement l'effet de la surface terrière qui était mis en évidence. Ces mêmes auteurs notent que Brix et Mitchel (1983) ont abouti aux conclusions inverses dans des peuplements de sapin douglas et ont montré que la combinaison d'une fertilisation azotée et d'une éclaircie influençait significativement la pente de la relation allométrique établie. Grier *et al.* (1984) n'ont pas détecté de différence significative dans les relations allométriques entre des peuplements fertilisés et non fertilisés, et ils attribuent ce comportement au fait que la réponse du couvert à la fertilisation n'est pas immédiate mais différée de 4 à 7 ans. Enfin, notons que Gower *et al.* (1999), dans une synthèse bibliographique, ont confirmé les effets de la fertilisation sur les relations allométriques.

Outre la richesse du milieu et la densité, le tempérament des essences influence les relations allométriques. Gower *et al.* (1999) notent ainsi que pour des diamètres similaires, les espèces tolérantes à l'ombre développent plus de feuilles que les espèces non tolérantes.

De nombreux travaux ont aussi cherché à déterminer les variables contribuant le plus significativement aux relations allométriques. Notons seulement que la surface d'aubier mesurée à la base de la cime semble être le meilleur prédicteur de la surface foliaire (Granier 1981 ; Shelbrune *et al.*, 1993 ; Makela *et al.*, 1995).

Les différents travaux cités ci-dessus mettent en évidence la difficulté de définir un protocole universel. La relation allométrique que l'on désire établir doit être considérée comme une propriété moyenne de tout le peuplement et l'échantillonnage préconisé doit considérer tous les facteurs influençant cette relation.

D'un point de vue purement statistique, il est important de rappeler que l'intérêt de l'allométrie est dans la possibilité d'établir une relation entre la masse ou la surface d'une partie ou de l'ensemble d'un organisme (surface ou masse foliaire) et une variable explicative facilement mesurable. Pour l'estimation de la surface foliaire ou la masse foliaire d'un arbre, les variables explicatives considérées sont, très souvent, le diamètre du tronc et la largeur ou la surface du bois d'aubier. Ces grandeurs sont mesurées, souvent pour des raisons pratiques, à 1,3 m du sol. La relation est souvent modélisée par une fonction de type puissance (Gower *et al.*, 1999) : Ms ou $S = a D^b$, Ms et S sont respectivement la masse sèche et la surface foliaire, D est le diamètre du tronc, tandis que a et b sont les coefficients d'ajustement.

Sprugel (1983) note que l'on suppose souvent que la variance est uniforme pour toute la gamme de variabilité du diamètre D . Autrement dit, que les résidus de l'ajustement ne présentent pas de tendance significative (les écarts entre la valeur mesurée et la valeur prédite seraient relativement similaires pour toute la gamme des diamètres D). L'expérience a montré que la variance augmente lorsque le diamètre D augmente. Sprugel (1983) propose de passer par un ajustement logarithmique pour uniformiser la variance : $\text{Log}(S) = a + b \text{Log}(D)$. Il note aussi que cette transformation introduit un biais systématique qui doit être corrigé. Le facteur de correction proposé est basé sur l'erreur standard de l'estimation.

L'établissement des relations allométriques pour la mesure de l'indice foliaire est une opération contraignante. Toutefois, c'est la seule méthode directe applicable pour les résineux : c'est donc pour ce type de peuplement qu'elle est la plus utilisée. Les relations allométriques sont destructives, dépendantes du peuplement étudié et le principe même de leur établissement les rend inadaptées pour un suivi annuel de l'indice foliaire. On peut enfin signaler que tout déséquilibre introduit dans le peuplement (par exemple au cours de la phase transitoire post-éclaircie) s'accompagne d'une dérive par rapport à une relation allométrique qui aurait été établie avant perturbation. La relation allométrique traduit précisément un état d'équilibre entre les surfaces conductrices (aubier) et évaporantes (feuilles). L'ouverture du couvert peut induire une vitesse différentielle dans l'augmentation des surfaces d'aubier et foliaires.

1.3. Méthode des aiguilles

Cette méthode proposée par Guittet (Laboratoire d'écophysiologie végétale, université d'Orsay) est dérivée de la méthode de "points quadrats inclinés" (Warren Wilson, 1959, 1960, 1963), qui consiste à enfoncer une fine aiguille dans le volume constitué par la végétation en place et à déterminer le nombre de contacts entre l'aiguille et les éléments foliaires dans une direction donnée par l'inclinaison de l'aiguille. Pour une couche de feuilles horizontales et pour une aiguille enfoncée verticalement, le nombre de contacts avec les feuilles de l'année est égal à l'indice foliaire. Appliquée à la litière en place, après la chute totale des feuilles, le nombre de contacts est déterminé en enfonçant verticalement une aiguille métallique fine d'environ 1 mm de diamètre dans la couche de feuillage au sol. Le nombre de feuilles comptabilisées correspond au nombre de contacts. Cette opération est répétée de nombreuses fois dans le peuplement, et l'indice foliaire est donné par la moyenne du nombre de contacts (Sabatier, 1989 ; Nizinski et Saugier, 1988, Dufrêne et Bréda, 1995 ; Soudani *et al.*, 2002). Cette technique nécessite un échantillonnage très intensif (de 100 à 300 points) pour aboutir à une estimation valable de l'indice foliaire mais reste plus rapide qu'une collecte de litière classique (2 heures à 4 personnes et 3 aiguilles pour une parcelle forestière) (Dufrêne et Bréda, 1995). Pour se garantir du caractère aléatoire des sondages, on peut s'aider d'une plaque perforée de trous réguliers ou s'imposer un plan d'échantillonnage régulier, qui alourdit le protocole. La période favorable pour mettre en œuvre la méthode de l'aiguille est courte, et doit être aussi rapide que possible dès la chute totale des litières. La méthode est plus délicate à mettre en œuvre dans le cas d'humus peu actifs, où les litières de plusieurs saisons s'accumulent, et dans le cas d'un couvert herbacé dense. La méthode n'est pas valable pour les espèces à très petites feuilles (folioles de frêne) ou à feuilles se décomposant très rapidement, pour lesquelles il est préférable d'opérer avant la fin de l'année.

La méthode des aiguilles a été utilisée dans un peuplement mature de chênes et de hêtres de la forêt indivise de Haguenau (Soudani *et al.*, 2002). 200 points de mesure disposés aléatoirement ont été soigneusement échantillonnés après la chute totale des feuilles. Le nombre de contacts varie de 1 à 9, la médiane est de 5 et la moyenne est de 4,7. Cette technique a fourni une mesure d'indice foliaire satisfaisante par rapport aux mesures indirectes (Demon, LAI-2000 et photographies hémisphériques).

2. Méthodes indirectes

Les méthodes indirectes optiques sont basées sur les relations existantes entre certains descripteurs structuraux, en particulier l'indice foliaire et l'extinction du rayonnement, la fraction de trouées et/ou le nombre de contacts. Les premiers travaux utilisant cette approche ont débuté avec l'inversion du modèle d'extinction de rayonnement de Beer-Lambert appliqué aux couverts forestiers par Monsi et Saeki (1953). La loi de Beer-Lambert, ou plus justement de Bouguer-Lambert, exprime l'atténuation du rayonnement dans un milieu absorbant, dit turbide homogène (substance absorbante dans un liquide, particules en suspension dans l'air). Dans un tel milieu, l'atténuation du rayonnement est proportionnelle à la distance parcourue. Appliqué aux couverts végétaux,

l'extinction est alors supposée de même type que celle observée dans un milieu absorbant. La distance parcourue est une distance "végétale" correspondant à l'indice foliaire.

Quelques années après les travaux de Monsi et Saeki (1953), Warren Wilson (1959, 1960, 1963) a établi les fondements théoriques des nouvelles relations entre l'indice foliaire et le nombre de contacts dans la méthode des points quadrats. L'invention de l'objectif hémisphérique par Hill (1924), pour photographier les nuages sur l'ensemble de la voûte céleste, et l'introduction de cette méthode pour des applications en écologie forestière par Evans et Combe (1959) et Anderson (1964), constituent les premiers travaux de référence fournissant des méthodes d'estimation de l'indice foliaire à partir des fractions de trouées. D'autres travaux, en particulier ceux de Bonhomme (1974), ont permis un développement théorique considérable des méthodes permettant d'estimer l'indice foliaire et la détermination des profils de rayonnement à partir des fractions de trouées. Lang et Xiang (1986), Lang (1986, 1987), Norman et Welles (1983), Norman et Jarvis (1974), Norman et Campbell (1989) ont présenté de nouveaux modèles et algorithmes de calcul pour l'estimation de l'indice foliaire et autres descripteurs structuraux. Ces modèles sont à l'origine des instruments commercialisés actuellement.

Les hypothèses sous-jacentes à ces modèles sont, sauf considérations particulières, les suivantes :

- 1 • Une distribution azimutale uniforme des éléments foliaires. Cette distribution traduit l'absence de directions privilégiées.
- 2 • Les éléments foliaires sont de petite taille par rapport au volume végétal considéré et ils sont distribués d'une façon aléatoire au sein de ce même volume.
- 3 • Les éléments du feuillage sont opaques à la lumière diffuse. La feuille est assimilée à un corps noir. Un rayon lumineux ne peut que passer à travers les trouées ou être stoppé. Cette hypothèse permet de considérer le volume végétal comme un milieu constitué seulement de trouées et de feuillage. Sur une photographie positive seuillée, un tel milieu est binaire : le ciel est en blanc (trouées) et la végétation est en noir (feuillage, troncs et branches).

Les méthodes indirectes mesurent toutes les fractions de trouées à différentes positions angulaires. Elles sont généralement rapides et fournissent de nombreuses informations sur l'organisation structurale du couvert (indice foliaire, degré d'ouverture du couvert, distribution des angles d'inclinaison foliaire, etc.). Néanmoins, rappelons-le, ces méthodes reposent sur une approche statistique de la distribution des éléments foliaires dans le couvert et utilisent des équations, relativement complexes, basées sur de nombreuses hypothèses. Outre les hypothèses propres aux modèles de calcul, d'autres suppositions relatives aux techniques doivent être introduites.

Les méthodes indirectes présentées dans la suite de ce travail sont les suivantes : LAI-2000 (Li-Cor Inc., Lincoln, NE, USA), DEMON (CSIRO, Centre of Environment Mechanics, Canberra, Australia), SunScan Canopy Analysis System (Delta-T Devices, Cambridge, United Kingdom.), LAI léger de Marc Dubois (Ferment et *al.*, 2001 ; Cournac et *al.*, 2000) et la technique de photographies hémisphériques zénithales. On présentera aussi les fondements théoriques de cette dernière technique ainsi que les systèmes d'acquisition et de traitement commercialisés actuellement.

Avant de développer ces techniques, nous allons illustrer l'inversion de la loi de Beer qui reste toujours de vigueur, en particulier pour suivre la dynamique saisonnière de l'indice foliaire d'un couvert forestier. Sa mise en œuvre nécessite toutefois quelques précautions que nous allons rappeler.

2.1. Utilisation de la loi de Beer-Lambert

La méthode d'estimation de l'indice foliaire par l'inversion de la loi de Beer-Lambert nécessite la mesure du rayonnement incident I_0 et sous couvert I , de manière intégrée dans le temps. L'effet de la durée d'intégration de la mesure de rayonnement a été discuté par Comeau *et al.* (1998). La longueur d'onde dans laquelle sont mesurés ces rayonnements dépend de l'appareillage utilisé (pyranomètre dans le rayonnement global ou capteur de PAR) et influence la valeur du coefficient d'extinction du rayonnement k . Ceci est dû au fait que la transmittance des feuilles dépend fortement de la longueur d'onde. Le rayonnement incident, idéalement mesuré au dessus du couvert, peut être mesuré dans un découvert proche de la parcelle étudiée.

$$I = I_0 e^{-kLAI} \quad \text{soit} \quad LAI = -L_N(I / I_0) / k$$

L_N est le logarithme népérien.

I_0 est le flux de rayonnement incident, I est le flux de rayonnement transmis, k le coefficient d'extinction et LAI est l'indice foliaire.

Cette approche suppose que le feuillage est distribué de manière aléatoire dans le couvert.

Etant donné que la fraction de rayonnement direct et diffus change au cours de la saison et en fonction du type de temps, il est nécessaire de trier les journées par type de rayonnement, en utilisant les formules proposées par Spitters *et al.* (1986). De même, il est préférable d'éliminer les débuts et fin de journée du calcul de transmittance en raison de la plus forte proportion de rayonnement diffus. Le coefficient d'extinction dépend de la longueur d'onde ($k = 0,65$ dans le PAR et $0,47$ dans le rayonnement global dans des mêmes parcelles de chêne chevelu, d'après Cutini, communication personnelle), du type et de la direction de rayonnement, de l'inclinaison foliaire et de la structure du couvert. Par exemple, une jeune futaie de chêne présente un coefficient d'extinction, estimé à partir de l'indice foliaire total calculé par allométrie, plus faible après éclaircie ($k = 0,29$, pour un $LAI = 3,9$) que dans sa partie témoin ($k = 0,38$ pour un $LAI = 4,9$) (Dufrêne et Bréda, 1995). Ce coefficient doit idéalement être déterminé pour chaque parcelle, ce qui nécessite la connaissance indépendante de l'indice foliaire à une date dans la saison à laquelle on dispose également des mesures de rayonnement (Gazarini *et al.*, 1990). L'inversion de la loi de Beer-Lambert est alors écrite pour calculer k , en fonction du LAI et des rayonnements mesurés. Il peut s'agir d'une estimation par ramassage de litières ou par allométrie (Vose et Swank, 1990, Smith *et al.*, 1991) ou par une autre méthode indirecte. Une relation inverse entre indice foliaire et coefficient d'extinction a été observée en comparant des peuplements feuillus (Johansson, 1989, Cannel *et al.*, 1989) ou de pins d'indices foliaires différents (Smith *et al.*, 1991), et il est recommandé d'utiliser une valeur de k plus élevée au moment de la mise en place de l'indice foliaire où la structure du couvert est plus agrégée (troncs et

branches) et l'indice foliaire est encore faible. Souvent, un coefficient d'extinction moyen par espèce est considéré comme suffisant pour calculer l'indice foliaire de cette manière. Pierce et Running (1988) proposent d'utiliser un k moyen de 0,52 pour les peuplements résineux. L'erreur introduite par cette constante dans l'estimation de plusieurs pinèdes a été quantifiée et discutée par Smith *et al.* (1991). La figure 3.2 illustre une évolution saisonnière de PAI calculé dans une chênaie et dans une hêtraie à partir de mesures de transmittance dans le rayonnement global et inversion de la loi de Beer-Lambert. Les coefficients d'extinction ont été calculés pour l'indice foliaire maximum estimé par ramassage de litières et sont respectivement de 0,3 dans la chênaie (Bréda *et al.*, 1995) et de 0,4 dans la hêtraie (Granier *et al.*, 2000).

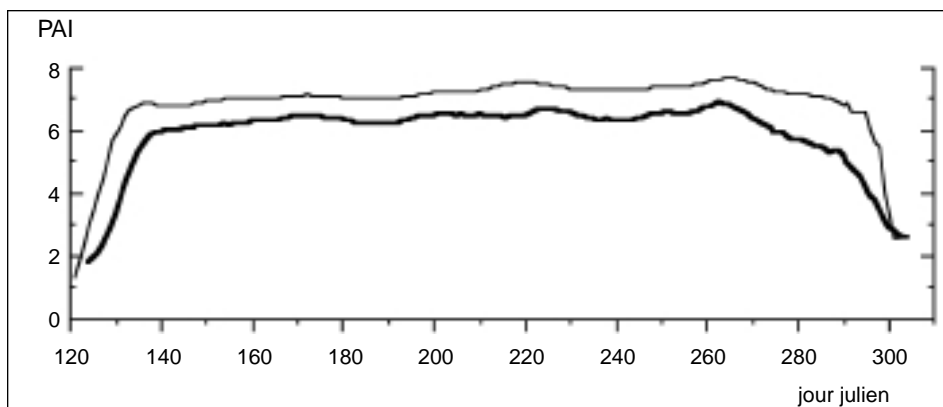


Fig.3.2. Exemple de dynamiques saisonnières de l'indice de surface total (PAI) estimé par inversion de la loi de Beer-Lambert dans une chênaie (trait gras, données N.Bréda) et dans une jeune hêtraie (trait fin, données A.Granier) de l'est de la France. Les coefficients d'extinction sont respectivement de 0,3 dans la chênaie et de 0,4 dans la hêtraie.

2.2. Analyseur de couvert LAI-2000

LI-COR, Inc

Box 4425 / 4421 Superior St

Lincoln, Nebraska 68504 USA

Tél. : 402-467-3576, 800-447-3576 • Fax : 402-467-2819

Site internet : www.licor.com

Description



Photo 3.1.

Analyseur de couvert LAI-2000: sonde munie du capteur optique à son extrémité, centrale de contrôle et d'acquisition LAI-2000, jeu de réducteurs d'angle de vue (caches) et manuel d'utilisation.

Centrale de contrôle :

Taille : 210 x 114 x 690 mm

Poids : 1,8 kg

Capteur :

Taille : 610 x 290 x 290 cm

Poids : 0,85 kg

L'analyseur de couvert LAI-2000 est constitué d'une centrale de contrôle et d'acquisition, alimentée par des piles et reliée à un capteur optique (*photo 3.1*). Ce capteur est muni d'une optique fish-eye (180° d'angle de champ) constitué de cinq cellules en silicium (photodiodes) arrangées en anneaux concentriques (*photo 3.2*). Le capteur optique est muni d'un filtre ne laissant passer que les radiations dans la bande spectrale [300-490 nm]. Dans cette gamme du spectre, la réflexion et la transmission du rayonnement diffus par les feuilles sont fortement réduites ($< 2\%$). Chaque cellule du capteur correspond à une classe d'angle azimutal ($0-360^\circ$) et une classe d'angles d'inclinaison de $0-13^\circ$, $16-28^\circ$, $32-43^\circ$, $47-58^\circ$ et de $61-74^\circ$, centrée respectivement sur 7° , 23° , 38° , 53° et 68° . Des masques opaques ou caches (270° , 180° , 90° , 45° , 15°), facilement adaptables sur le capteur, permettent de limiter l'angle de vue en azimut (*photo 3.2*). Ils sont très utiles lorsqu'il s'agit d'étudier des couverts présentant des asymétries azimutales, pour éviter des objets indésirables ou pour masquer l'opérateur. Notons dès à présent que le signal mesuré par ce capteur n'est pas calibré et ne fournit donc que des indices de lumière relatifs. Une calibration est possible en connectant sur la centrale d'acquisition un capteur PAR (Li-Cor) et en réalisant des acquisitions simultanées avec les deux équipements. Plusieurs travaux relatifs à ce type d'étalonnage peuvent être consultés (Hanan et Bégué, 1995, Comeau *et al.*, 1998).

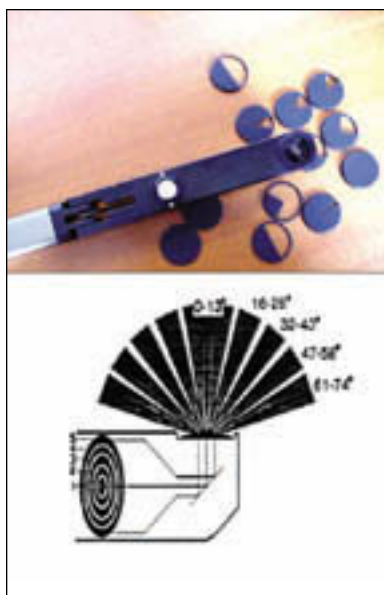


Photo 3.2. Partie sensible du capteur du LAI-2000 munie d'un niveau à bulle. Les disques correspondent à des masques azimutaux. Ces caches sont très utiles lorsque la distribution des éléments foliaires ou du rayonnement diffus présente une hétérogénéité azimutale ou pour masquer l'opérateur ou des objets indésirables, des lisières, trouées, etc.

En bas, le capteur fish-eye : le rayonnement reçu est renvoyé par un miroir sur cinq cellules concentriques, correspondant aux classes d'élévation $0-13^\circ$, $16-28^\circ$, $32-43^\circ$, $47-58^\circ$ et $61-74^\circ$.

Acquisition et traitement

Les radiations en provenance du ciel sont mesurées en deux prises : l'une en-dessous et l'autre au-dessus du couvert. Elles sont notées respectivement B (Below canopy) et A (Above canopy). Le rapport B/A pour un anneau, centré sur un angle quelconque, correspond à la fraction de trouées mesurée par rapport à la direction correspondante. Les fractions de trouées sont ensuite utilisées dans les modèles de calcul pour estimer l'indice foliaire et les autres paramètres de structure.

Les acquisitions sont rapides (2 secondes par acquisition) et doivent s'effectuer par temps couvert homogène ou par temps clair avec soleil bas sur l'horizon (au lever

etau coucher du soleil).Sous de telles conditions, le rayonnement est relativement stable entre les deux acquisitions sous couvert et de référence, et l'absence de rayonnement direct permet de réduire les phénomènes de réflexion par les feuilles, qui peuvent être à l'origine d'une surestimation des fractions de trouées. Les acquisitions A, dites de référence, s'effectuent au-dessus du couvert ou en dehors de la forêt dans un endroit suffisamment dégagé pour éviter les interceptions du rayonnement par les arbres situés au voisinage (*photo 3.3*).Signalons que l'emploi des caches permet de réaliser des mesures de référence dans des endroits plus réduits. Le dégagement théorique minimal est de 3,5 fois la hauteur des arbres.Il correspond au produit de la hauteur du couvert et de la tangente de l'angle zénithal de l'anneau considéré (*fig. 3.3, tab. 3.4*). Cette portée spatiale du capteur doit également être gardée à l'esprit lors des acquisitions sous couvert, afin d'éviter des recouvrements entre les zones du couvert vues par le capteur entre deux mesures (autocorrélation).Signalons encore qu'une réflexion préalable sur l'échantillonnage des points de mesure sous couvert est à mener en fonction de chaque peuplement étudié,de son hétérogénéité et de sa hauteur. Les travaux de Chason *et al.* (1991) ou de Nackaerts *et al.* (2000) discutent de la précision sur la mesure de l'indice foliaire selon l'intensité d'échantillonnage.

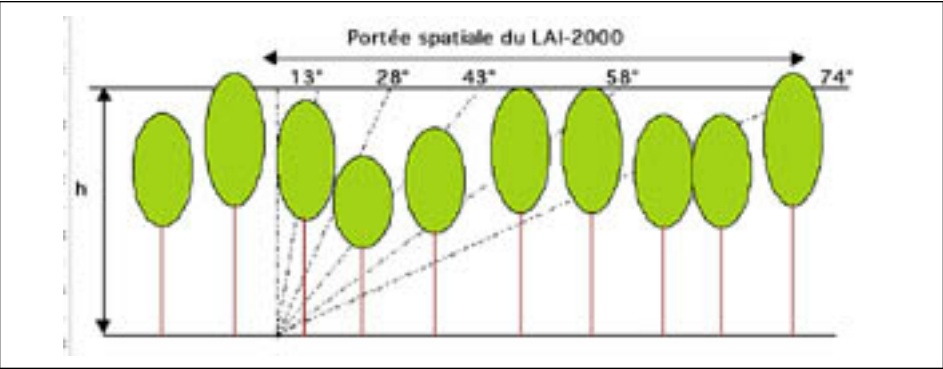


Fig.3.3. Portée spatiale théorique de l'analyseur de couvert LAI-2000.

Tab. 3.4. Portée spatiale théorique pour les différents anneaux du LAI-2000.

Hauteur du couvert (m)	Portée spatiale (m) :h * tg()				
	74°	58°	43°	28°	13°
10	34,87	16,00	9,33	5,32	2,31
12	41,85	19,20	11,19	6,38	2,77
14	48,82	22,40	13,06	7,44	3,23
16	55,80	25,61	14,92	8,51	3,69
18	62,77	28,81	16,79	9,57	4,16
20	69,75	32,01	18,65	10,63	4,62
22	76,72	35,21	20,52	11,70	5,08
24	83,70	38,41	22,38	12,76	5,54
26	90,67	41,61	24,25	13,82	6,00
28	97,65	44,81	26,11	14,89	6,46
30	104,62	48,01	27,98	15,95	6,93
32	111,60	51,21	29,84	17,01	7,39
34	118,57	54,41	31,71	18,08	7,85

Les mesures sous couvert sont rapides. Une demi-heure suffit pour échantillonner une parcelle de quelques hectares. L'opérateur maintient le capteur à l'horizontale à l'aide d'un niveau à bulle. L'acquisition est effectuée en prenant soin de ne pas obstruer le champ de vue du capteur. Le capteur peut être maintenu au-dessus de la tête (*photo 3.4*) ou en utilisant un cache dans la direction de l'opérateur permettant ainsi d'effectuer des mesures sur la portion opposée de l'hémisphère (*photo 3.5*).



Photo 3.3. Mesure du rayonnement diffus de référence au-dessus du couvert (Site atelier de Hesse (57) France).

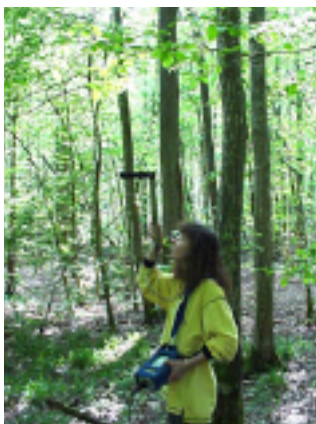


Photo 3.4. Mesure du rayonnement sous couvert en maintenant le capteur au-dessus de la tête.



Photo 3.5. Mesure du rayonnement sous couvert en utilisant un cache azimutal de 180°.

Rappelons que l'analyseur de couvert LAI-2000 a été développé pour des applications agronomiques, et que sa conception est prévue pour des couverts bas. Ainsi, une centrale connectée simultanément à deux capteurs, l'un sous le couvert et l'autre au-dessus, permet une acquisition synchrone et au même point des deux rayonnements A et B. L'équipement n'est pas conçu pour travailler en forêt et les solutions proposées nécessitent une adaptation de l'opérateur. La première difficulté concerne la mesure du rayonnement au-dessus du couvert, ce qui n'est généralement pas possible pour les peuplements adultes. Lorsqu'on ne dispose que d'un seul appareil, l'opérateur peut effectuer des mesures de référence hors forêt, au début et à la fin des mesures sous couvert. L'interpolation linéaire en fonction du temps entre les deux acquisitions de référence fournit des estimations correctes de l'indice foliaire, à la condition expresse qu'il n'y ait pas de perturbations météorologiques dans l'entre temps. Les acquisitions peuvent s'effectuer par temps clair, au début ou vers la fin de la journée. Les phénomènes de réflexion sont réduits et l'évolution du rayonnement entre deux acquisitions est liée à la course solaire et est plus régulière. Les acquisitions peuvent aussi s'effectuer par ciel couvert : une stabilité suffisante des conditions du ciel est alors nécessaire. L'expérience a montré que la stabilité du ciel est difficilement appréciable à l'œil nu surtout sous forêt et les erreurs provoquées sont imprévisibles et incontrôlables. Il est conseillé d'utiliser simultanément deux instruments, un pour la mesure au-dessus du couvert (*photo 3.3*) et l'autre pour la mesure en dessous (*photo 3.4* et *3.5*). Cependant l'utilisation de deux instruments nécessite une intercalibration préalable des capteurs. Soumis au même rayonnement, ces deux capteurs doivent

fournir les mêmes mesures. L'intercalibration consiste à déterminer cinq coefficients multiplicateurs (un pour chaque anneau) permettant le passage d'un instrument à l'autre. Une fois déterminés, ces coefficients sont introduits dans l'unité de contrôle. Notons que ces coefficients sont relatifs et ne permettent que le passage d'un capteur à un autre. Si un équipement complet peut être dévolu à la mesure de référence et si cette mesure est réalisée toujours dans la même orientation, l'acquisition du rayonnement incident peut être automatique à un pas de temps défini par l'opérateur en programmant la centrale.

Lorsque plusieurs acquisitions ont été effectuées, le fichier constitué et transféré sur ordinateur ne s'apprête pas encore aux traitements et quelques modifications de l'organisation des données sont nécessaires. Les mesures de référence et sous couvert sont fusionnées à l'aide d'un éditeur de texte (ou d'une option du programme de traitement) et le fichier résultant peut être alors traité.

L'estimation de l'indice foliaire est effectuée à partir de ce fichier grâce à un programme de calcul C2000.EXE (mode DOS sous PC). Ce programme offre plusieurs possibilités d'exploitation des données : quatre modèles d'estimation de l'indice foliaire, plusieurs options de traitement des mesures de référence et l'accès à d'autres informations telles que les fractions de trouées et les paramètres de la distribution des angles foliaires, l'angle foliaire moyen, etc. Le manuel d'utilisation du LAI-2000 et le support théorique (2000-90 Software, version 2.15, avril 1993) permettent une bonne maîtrise du programme de calcul C2000.EXE et une meilleure exploitation des potentialités offertes par cet instrument.

2.3. DEMON

CSIRO : Centre for Environmental Mechanics

GPO Box 821, Canberra, ACT 2601

Australia

Site internet : www.cbr.clw.csiro.au/pyelab/tour/demon.htm

Description



Photo 3.6.
Instrument DEMON :
à gauche, le capteur
et à droite le boîtier
de contrôle
et d'acquisition.

Contrairement au LAI-2000, le DEMON a été développé dans l'optique d'une utilisation en forêt par A. R. G. Lang, chercheur en foresterie du CSIRO. Actuellement, le suivi de cet équipement est toujours assuré par le CSIRO (contact : Garry Miller). Le DEMON est constitué d'une centrale de commande et d'acquisition reliée à un capteur optique permettant de mesurer le rayonnement incident direct, en provenance du soleil, dans une bande spectrale située autour de 430 nm (*photo 3.6*). Le capteur ne fournit pas un signal calibré en terme d'énergie et le signal n'est utilisable qu'en relatif (calcul de transmittance). L'équipement fonctionne sur batterie rechargeable. La méthode DEMON est une extension de la méthode du point quadrat (Warren Wilson, 1959, 1960, 1963), où l'aiguille est remplacée par une sonde fictive correspondant au faisceau solaire. Le principe consiste donc à mesurer l'occultation du rayonnement direct par les obstacles végétaux. Le capteur est directionnel avec un angle solide d'ouverture de 0,302 stéradian. Cette bande de visée étroite permet la mesure fréquente du rayonnement direct incident dans une petite trouée ou sur un chemin, ce qui constitue un avantage certain en forêt.

Acquisition et traitement

L'acquisition des données repose sur la mesure du rayonnement direct en dessous de la végétation et hors couvert pour différentes positions solaires atteintes au cours de la journée. Un utilitaire DEMONUT permet de calculer *a priori* les hauteurs solaires toutes les 10 minutes pour un site d'étude (défini par sa latitude et sa longitude) et une date de mesure donnés. L'utilisateur a donc le choix des heures de passages adéquates pour couvrir une large gamme de positions solaires. Pour chaque position solaire, la fraction de trouées est donnée par le rapport entre le rayonnement transmis et le rayonnement incident direct. Les conditions d'acquisition les plus propices sont celles d'un ciel clair parfaitement dégagé. Elles correspondent à celles rencontrées en été et présentent l'avantage d'une très bonne stabilité. L'interpolation des données-références hors couvert est très fiable dans ces conditions. En revanche, lorsque le soleil est très bas pendant les saisons d'automne et d'hiver, en particulier dans les régions de moyenne et de haute latitude, la gamme de positions solaires est réduite.

Photo 3.7. Mesure du rayonnement de référence à l'aide du DEMON.



La mesure du rayonnement direct à découvert, dit de référence, s'effectue en pointant le capteur vers le soleil. Un chemin forestier ou une petite clairière sont suffisants pour effectuer cette mesure (*photo 3.7*). Sous couvert, l'opérateur doit maintenir le capteur bien pointé vers le soleil et marcher perpendiculairement aux ombres projetées des troncs (*photo 3.8*). Une mesure s'affiche sur le petit écran de la centrale pour une durée de déplacement d'environ 34 secondes (environ 20 m de déplacement). Cette mesure est la moyenne arithmétique de 1 024 mesures intermédiaires, collectées à une fréquence de 30 Hz (moyenne linéaire). Le DEMON détermine la moyenne du logarithme népérien de chacune de ces 1 024 mesures intermédiaires (moyenne

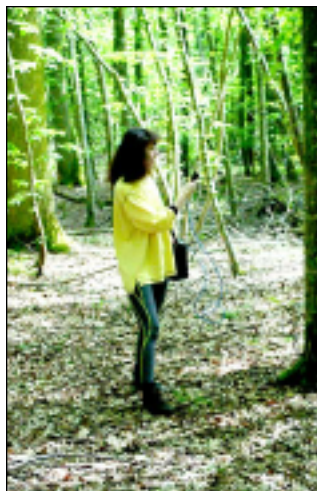


Photo 3.8.

Mesure du rayonnement transmis sous couvert lors d'un cheminement avec le DEMON

logarithmique) selon une procédure proposée par Lang (1991). Pour plus de détails concernant cette procédure, le lecteur peut consulter Soudani *et al.* (2002).

Les cheminements, capteur azimuté sur le soleil, peuvent s'avérer délicats dans des terrains accidentés (rochers, troncs et branches sur le sol) ou dans des forêts présentant un abondant sous-bois. Le temps d'acquisition du DEMON est rapide à chaque passage, mais idéalement trois passages dans la demi-journée, incluant le zénith local, sont souhaitables pour déterminer les fractions de trouées à plusieurs élévations. Certains opérateurs choisissent de n'effectuer qu'un seul passage dans la journée, à l'heure à laquelle la hauteur du soleil est voisine de 35° . Dans ce cas, suivant le théorème de Cauchy (Lang, 1991), l'effet de l'orientation des éléments du couvert est minimisé et le temps d'acquisition est réduit (Berbigier, communication personnelle).

Le traitement des données ne nécessite pas de remise en forme et est donc rapide ; il s'effectue à l'aide du programme de calcul DEMON Demsoft (mode DOS sous PC), qui calcule l'indice foliaire (modèles de Lang, 1986 et 1987) et l'angle foliaire moyen (Lang, 1986). Le modèle de calcul de Lang est bien adapté pour les couverts discontinus, très fréquents en forêts. Le programme présente une interface graphique permettant de visualiser la position solaire des différentes mesures ainsi que leur distribution.

2.4. SunScan Canopy Analysis system

Delta-T Devices Ltd

128 Low Road, Burwell, Cambridge, CB50EJ-England

Tél. : 01638 742 922 • Fax : 01638 743 155

Site internet : www.delta-t.co.uk

Description



Photo 3.9.

Système standard SunScan, comprenant la sonde SunScan (type SS1), le terminal Psion Workabout (type DCT1) et le capteur de rayonnement Beam Fraction Sensor BFS (type BF1)

Le SunScan est commercialisé par Delta-T Devices. Il s'agit là encore d'un équipement développé pour l'agronomie et mal conçu pour une utilisation forestière dans sa version de base. Ce système permet la mesure du rayonnement photosynthétiquement actif (PAR), de l'indice foliaire et de l'angle foliaire moyen.

Le système SunScan est constitué d'une sonde linéaire de 1 m de long sur laquelle sont disposées 64 photodiodes équidistantes qui mesurent le rayonnement dans la bande du PAR de 400 à 700 nm (*photo 3.9* et *3.10*). C'est le seul équipement qui fournit un signal calibré. Le capteur linéaire est relié à un terminal offrant des fonctionnalités de configuration, de contrôle, de stockage et de traitement des acquisitions (Psion Workabout) (*photo 3.11*). Ce terminal peut être remplacé par un PC portable. La sonde est reliée à un capteur BFS (Beam Fraction Sensor) permettant de mesurer le rayonnement incident, direct et diffus. Le rayonnement diffus est mesuré dans l'ombre projetée d'un anneau équatorial (*photo 3.12*).



Photo 3.10.
Sonde SunScan type SS1



Photo 3.11.
Psion type DCT1



Photo 3.12. Capteur
de rayonnement BFS type BF1

Les principales caractéristiques de cet instrument sont données dans le tableau 3.5 :

Tab. 3.5. Caractéristiques du système SunScan.

Sonde SunScan type SS1	Terminal d'acquisition de données Psion Workabout type DCT1	Beam Fraction Sensor type BF1
<p>Dimensions : 1 000 x 13 mm, munie de 64 photodiodes espacées de 15,6 mm.</p> <p>Réponse spectrale : 400-700 nm (PAR).</p> <p>Temps de mesure : 120 ms.</p> <p>Valeur maximale du rayonnement : 2 500 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$</p> <p>Résolution : 0,3 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$.</p> <p>Energie : 4 piles Alkaline AA (durée de vie 1 an).</p>	<p>Ecran/clavier : 10 lignes x 40 caractères alphanumériques.</p> <p>Mémoire : Flashcards de 256 Ko ou de 1 MB.</p> <p>Visualisation des acquisitions et des résultats : indice foliaire, PAR moyen et lectures individuelles (64 mesures par acquisition).</p> <p>Le Psion peut être remplacé par un PC portable présentant au minimum les caractéristiques suivantes : système d'exploitation MS-DOS 3.3, 512 Ko de mémoire, 80 x 25 en affichage écran, port série RS232 et lecteur disquette 3,5".</p>	<p>Dimensions : 160 x 80 x 65 mm.</p> <p>Valeur maximale du rayonnement : 2 500 $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$.</p> <p>Acquisition : rayonnement direct et diffus dans le PAR.</p> <p>Câble liant le BF1 à la sonde : de 7 m (standard) à 100 m.</p> <p>Energie : piles NiCd (durée de vie de 15 heures) ou piles Alkaline 2 x AA.</p>

Acquisition et traitement

Dans sa configuration standard, le système SunScan est donc composé de deux capteurs. Le BFS qui mesure le rayonnement incident au-dessus du couvert, en distinguant entre les rayonnements direct et diffus, et la sonde SunScan qui mesure le rayonnement transmis sous couvert. Le BFS doit rester relié à la sonde SunScan. Ce mode d'acquisition est bien adapté aux cultures pour lesquelles la distance entre le BFS et le SunScan peut être relativement courte. Pour les couverts forestiers, ce mode d'acquisition est inadapté car cette distance est importante et souvent encombrée d'obstacles. Pour remédier à ces problèmes et adapter le système SunScan aux couverts forestiers, deux solutions sont actuellement proposées (ECOTECHNIC, communication personnelle) :

La première solution consiste à remplacer la connexion directe par câble entre le SunScan et le BFS par une transmission radio permettant ainsi des acquisitions simultanées au-dessus et en dessous du couvert (vitesse de transmission radio et de conversion des données mises à part) (fig. 3.4). La portée théorique de la transmission en champ libre est d'environ 1 000 m. Sous couvert, elle est inversement proportionnelle au nombre et aux dimensions des obstacles (feuilles, troncs et branches). Pratiquement, la portée de la transmission se situe entre 150 et 200 m (ECOTECHNIC, communication personnelle).

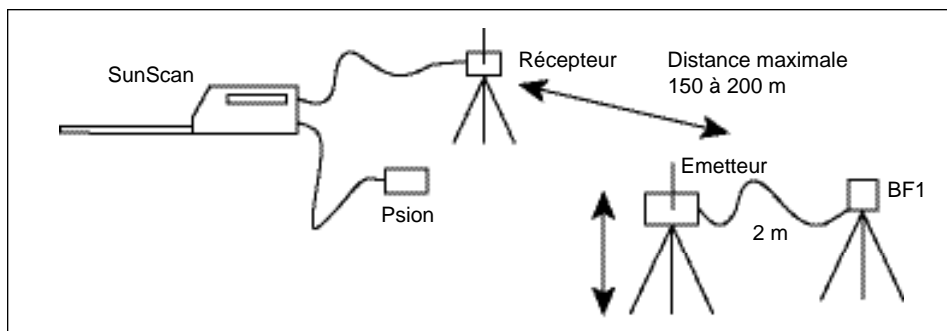


Fig. 3.4. Système SunScan à transmission radio pour l'estimation de l'indice foliaire des couverts forestiers.

La deuxième solution conduit à déconnecter la centrale d'acquisition BFS du capteur SunScan. Le BFS est connecté à une centrale indépendante permettant des enregistrements à un pas de temps fixe du rayonnement incident de référence, direct et diffus. Pendant ce temps, le SunScan enregistre le rayonnement transmis sous couvert. Ces données sont stockées dans deux fichiers différents qui sont, ensuite, croisés pour les traitements. Malgré le travail supplémentaire de dépouillement des données, cette solution semble mieux adaptée aux couverts forestiers. Néanmoins, il est important de rappeler que l'enregistrement à un pas de temps fixe du rayonnement incident nécessite une centrale d'acquisition à capacité mémoire suffisante. Actuellement, trois types de centrales d'acquisition sont commercialisés. La capacité mémoire est de 32 kilooctets, 128 kilooctets ou 1 500 kilooctets. Les enregistrements du rayonnement direct et du diffus sont effectués toutes les secondes. La durée totale d'enregistrement est d'environ 3 h pour une capacité mémoire de 32 Ko, 12 h pour 128 Ko et 130 h pour 1 500 Ko.

En simultané, les acquisitions au-dessus et en dessous du couvert peuvent s'effectuer en tout temps, par ciel clair ou couvert. Sous couvert forestier, l'opérateur immobile maintient à l'horizontale le capteur linéaire à photodiodes (photo 3.13). L'opérateur doit aussi veiller à ne pas obstruer le champ de vision dans la direction du rayonnement direct.



Photo 3.13.

Mesure du rayonnement transmis direct et diffus sous couvert par le SunScan.

Lorsqu'on dispose d'un seul appareil, sans une centrale d'acquisition, les problèmes posés par l'emploi du système SunScan sont comparables à ceux du Plant Canopy Analyser LAI-2000. Une homogénéité des conditions du ciel entre les mesures sous couvert et les mesures de référence est nécessaire. Sous un rayonnement direct, les mesures doivent s'effectuer en maintenant le capteur linéaire horizontalement puisque la quantité du rayonne-

ment mesurée est étroitement liée à l'angle d'incidence. Sous un rayonnement diffus, le positionnement du capteur est moins déterminant puisque la distribution du rayonnement est supposée uniforme.

Lorsque le SunScan et le BFS réalisent des acquisitions simultanées, le traitement des données acquises est effectué en temps réel à partir du programme SunData du boîtier de contrôle. Le traitement peut aussi s'effectuer lors du transfert des données sur l'ordinateur à l'aide du programme de calcul SunData.exe (mode DOS sous PC).

Le programme de calcul offre à l'utilisateur de nombreuses boîtes de dialogue permettant de modifier certains paramètres (coordonnées du site, absorption foliaire, etc.). Un utilitaire permettant de calculer les hauteurs solaires à un pas de temps horaire est aussi disponible. Les résultats de calcul (PAR transmis, direct et diffus, et l'indice foliaire) sont sauvegardés dans un fichier texte. Notons que le manuel d'utilisation du SunScan est suffisamment riche pour permettre une maîtrise rapide de l'instrument ainsi que des fondements théoriques des modèles utilisés.

2.5. LAIMETRE LEGER (LAIL)

Marc Dubois

Commissariat à l'Energie Atomique

F-91191 Gif-sur-Yvette Cedex

Tél. : 01 69 08 74 18

Fax : 01 69 08 87 86

E-mail : mad@amoco.saclay.cea.fr

Description



Photo 3.14. Equipement LAI-Léger



Photo 3.15.
Acquisition LAI-Léger sous forêt

Le LAImètre, dit LAI-Léger, a été mis au point par Marc Dubois, chercheur au Commissariat à l'Energie Atomique. Les travaux de validation de cet instrument ont été effectués en forêts tropicales par Dubois (communication personnelle), Walter *et al.* (2001), Cournac *et al.* (2000) et Ferment *et al.* (2001).

Le LAI mesure un rayonnement transmis (spectre de sensibilité du capteur non précisé) et l'exprime sous la forme d'une résistance électrique. Il est constitué par un tube cylindrique, d'environ 10 cm de long, relié par deux fils aux bornes d'un multimètre-ohmmètre (type standard de 10 à 100 kW) (photo 3.14). A l'extrémité du tube, une optique, constituée par un judas de porte permet, l'acquisition du rayonnement transmis dans un angle de champ hémisphérique de 180°. Cette optique est reliée à une photo-résistance (type VT 635G, EGetG Vactec, USA) qui permet de transformer le rayonnement absorbé en impulsions électriques. La résistance ainsi créée est mesurée à l'aide du multimètre-ohmmètre branché à la photo-résistance. Notons que le temps de réponse de cette photo-résistance est assez long.

La méthode d'estimation de l'indice foliaire par le LAI est basée sur la loi de Beer-Lambert :

$$I = I_0 e^{-kLAI} \quad \text{soit} \quad LAI = (L_N(I_0) - L_N(I)) / k \quad (3.1)$$

L_N est le logarithme népérien.

I_0 est le flux de rayonnement incident, I est le flux de rayonnement transmis, k le coefficient d'extinction et LAI est l'indice foliaire.

Dubois établit une relation d'étalonnage entre la résistance R , mesurée par le multimètre du LAI-Léger, et le rayonnement, mesuré par un pyranomètre Licor (LI-200 SB, Licor, USA). Les deux instruments étaient soumis à une source de lumière

blanche calibrée (lampe halogène, modèle HQI-TS, OSRAM, Allemagne). Des filtres neutres (NG series, Corion, USA), installés sur la lampe, permettent de faire varier l'intensité lumineuse (Cournac et al., 2000). La relation entre $L_N(I)$ et $L_N(R)$ est de type :

$$L_N(I) = a (L_N R)^2 + b(L_N R) + c \tag{3.2}$$

a, b et c sont les paramètres de l'ajustement. R est la résistance mesurée en kW.

L'indice foliaire LAI est donné par :

$$LAI = 1/k (-a (L_N R)^2 - bL_N R - c + L_N I_0) \tag{3.3}$$

Alors que la résistance R est directement mesurée par le LAIL, l'estimation de l'indice foliaire par l'équation 3.3 nécessite une connaissance préalable du coefficient d'extinction k et la quantité du rayonnement incident I_0 . Cournac *et al.* (2000) estiment le coefficient k à partir d'une série d'acquisitions avec l'analyseur de couvert LAI-2000 en forêt tropicale. Cette valeur est de 0,88. Il est important de signaler que pour assurer une relative indépendance du coefficient d'extinction et de l'angle solaire, l'estimation de ce coefficient a été effectuée au milieu de la journée avec un soleil pratiquement au zénith. Les mêmes auteurs établissent ensuite une échelle de variabilité de la quantité $-L_N(I_0)/k$, notée CC, pour différentes conditions de lumière sous couvert. Cinq classes de lumière ont été déterminées (tab. 3.6) :

Tab. 3.6. Coefficient CC pour différentes conditions de lumière sous couvert (Cournac *et al.*, 2000).

B	taches de lumière bien brillantes au sol et ombres bien visibles	CC=0
BL	taches de lumière pâles et ombres encore visibles	CC=-0,3
L	taches de lumière absentes et ombres encore visibles	CC=-0,6
LC	conditions intermédiaires entre C et L	CC= -0,9
C	très sombre	CC = -1,2

L'indice foliaire est déterminé par la relation suivante :

$$LAI = 1/k (-a (L_N R)^2 - b L_N R - c) + CC \tag{3.4}$$

Le principe d'acquisition LAIL consiste à maintenir l'appareil au-dessus de la tête, afin de ne pas obstruer le champ de vue, et à noter la résistance affichée (*photo* 3.15). Cette opération est répétée plusieurs fois afin de déterminer une résistance moyenne. Notons que le temps de réponse de la diode est assez long, et la résistance affichée est très fluctuante. Cette résistance moyenne est ensuite injectée dans l'équation 3.4 pour estimer l'indice foliaire en utilisant un coefficient k préalablement établi et en corrigeant cette estimation par le coefficient CC. Dubois préconise d'effectuer des mesures lorsque le soleil est proche du zénith et d'éviter des mesures dans des taches de lumière.

Outre les hypothèses théoriques à la base de la loi de Beer-Lambert, le LAIL introduit d'autres simplifications. En effet, l'idée fondatrice de cette technique est de simplifier la loi de Beer-Lambert en remplaçant les paramètres difficilement

mesurables *in situ* par des constantes prédéterminées. Le coefficient k est remplacé par une valeur estimée préalablement ou à partir de données bibliographiques. Le rayonnement incident au-dessus du couvert est supposé correspondre à l'une des cinq situations de lumière déterminées sous couvert. Il est donné par le coefficient correcteur CC. Dans ces conditions, l'estimation de l'indice foliaire revient à estimer uniquement le rayonnement transmis. Ces simplifications peuvent être adaptées à des forêts tropicales denses mais elles sont peu réalistes en forêts ouvertes et hétérogènes. Suite à la proposition de Pierce et Running (1988) d'utiliser un coefficient d'extinction de 0,52 unique pour les peuplements de conifères, Smith *et al.* (1991) ont étudié 43 parcelles de 12 x 12 m dans des peuplements équiennes de sapin Douglas (Île de Vancouver, Colombie britannique). Ces auteurs ont montré une forte variabilité du coefficient d'extinction et ont noté que l'indice foliaire ne pouvait pas être estimé à partir d'une valeur unique de ce coefficient. Dans des forêts matures de feuillus, Vose *et al.* (1995) ont abouti aux mêmes conclusions. Le coefficient k varie entre 0,53 à 0,67. L'application d'un coefficient d'extinction moyen de 0,62 a abouti à des estimations nettement différentes de celles obtenues par la méthode de collecte de litière. Ces auteurs notent que différents facteurs (composition en espèces, distribution verticale du feuillage, densité, etc.) sont à l'origine de la variabilité du coefficient d'extinction et ajoutent que l'estimation de ce coefficient demeure une tâche difficile. Remarquons aussi que le coefficient d'extinction dépend fortement de la position solaire. Cournac *et al.* (2000) proposent d'effectuer des mesures autour du midi solaire, puisque à des positions solaires suffisamment hautes, le coefficient d'extinction est peu influencé par l'angle solaire en particulier pour des distributions foliaires à prédominance verticale. Enfin, il faut noter que la définition du rayonnement incident à partir des coefficients correcteurs CC est une opération subjective puisque l'expérience montre qu'il est très difficile d'apprécier les conditions de rayonnement visuellement. En tout état de cause, aucune publication testant et validant ce capteur en forêt tempérée n'est actuellement disponible.

2.6. Photographies hémisphériques

Cette technique a depuis très longtemps été utilisée pour décrire, cartographier et quantifier le microclimat lumineux sous couvert (Anderson, 1964, Becker, 1971, Ducrey, 1975 a et b) ou estimer l'indice foliaire du couvert (Bonhomme, 1970, 1974). La démarche est relativement lourde et nécessite de nombreuses étapes depuis la prise de vue jusqu'au calcul des informations désirées, ce qui a fait reculer son utilisation lorsque les analyseurs de couvert se sont développés. Toutefois, avec l'avènement des appareils photographiques numériques, la technique semble de nouveau d'actualité. Notons cependant que peu de travaux sont encore disponibles pour évaluer la qualité des images numériques par rapport aux photographiques classiques (Frazer *et al.*, 2001). Dans la suite de ce travail, la mise en œuvre, les avantages et les inconvénients de la photographie hémisphérique classique sont dégagés. De même, une évaluation du temps de chaque étape sera fournie. On distinguera entre la technique des photographies hémisphériques proprement dite, classique ou numérique (géométrie de la projection hémisphérique, conditions d'acquisition, contraste et choix du seuil) et les principaux outils d'exploitation des données (logiciels de traitement des photographies hémisphériques, modèles et algorithmes de calcul pour l'estimation des différents paramètres de structure).

2.6.1. Principe de la technique des photographies hémisphériques

Rappelons que les méthodes indirectes (LAI-2000, DEMON, SunScan, etc.) mesurent les fractions de trouées, à différentes positions angulaires, à partir de mesures de transmission du rayonnement sous le couvert. De même, l'objectif des photographies hémisphériques est de fournir une cartographie de la végétation qui surplombe le niveau de la prise de vue. Une grille, dont les caractéristiques sont déterminées par la nature de l'objectif photographique, est appliquée sur la photographie afin de déterminer les fractions de trouées par classes d'angle zénithal et azimutal. Ces fractions angulaires de trouées sont ensuite utilisées dans les mêmes modèles de calcul que ceux employés par les autres méthodes pour estimer les principaux paramètres de structure du couvert.

Une photographie hémisphérique est une photographie réalisée avec un objectif grand angulaire à très faible focale (6 à 16 mm) et un angle de champ de 180° ou presque. A la différence des objectifs grands-angulaires (28 ou 24 mm de focale) qui donnent des perspectives linéaires, l'objectif fish-eye donne une perspective curviligne et fournit une image semblable à celle réfléchie par un miroir convexe. Les lignes verticales, situées dans un plan parallèle au cliché photographique, sont représentées par des lignes courbes sur le plan de l'image. Au contraire, les lignes horizontales, perpendiculaires au cliché, sont représentées par des lignes droites allant du centre de l'image vers les bords.

Prise sous une forêt, l'image est circulaire et présente la voûte céleste (ciel et végétation) située au-dessus du niveau de mesure (*photo 3.16*). Les trouées du ciel correspondent à des taches claires sur l'image positive (sombres sur l'image négative). L'image positive est ensuite seuillée en deux classes : le ciel apparaît en blanc et la végétation en noir (*photo 3.17*). Nous reviendrons plus loin sur les problèmes posés par le seuillage.



Photo 3.16. Photographie hémisphérique sous un couvert de hêtre (8 bits 0 à 255).

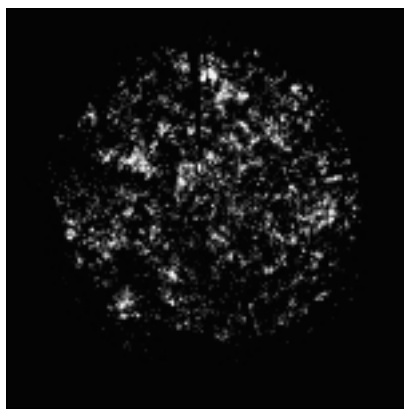


Photo 3.17. Photographie seuillée à 160 (végétation en noir, ciel en blanc).

Lorsque l'axe optique de l'objectif est parfaitement vertical, le centre de l'image coïncide avec la verticale et la position d'un point de la voûte hémisphérique sur l'image circulaire est en relation avec sa position angulaire. Un point M de la voûte, défini par son inclinaison par rapport à la verticale et son azimut, est localisé par sa position azimutale et sa distance radiale du centre sur le disque de l'image (*fig. 3.5*).

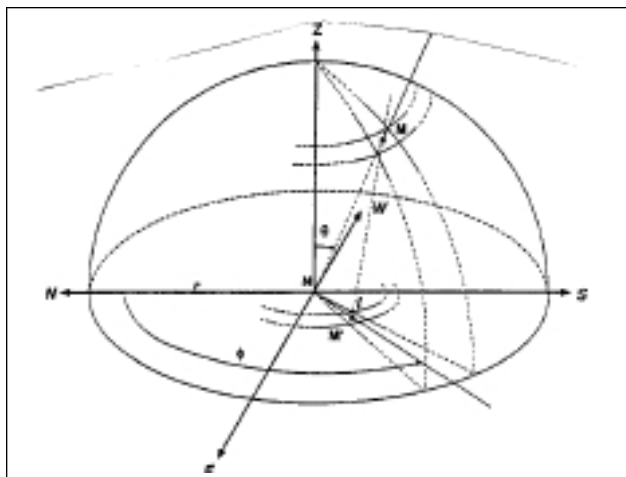


Fig. 3.5. Passage du plan convexe hémisphérique à l'image plane hémisphérique (Walter, 1999).

Alors que la position azimutale est inchangée (Herbert, 1987), la distance radiale dépend de la géométrie de la projection propre à l'objectif utilisé. Deux types de projection hémisphérique sont souvent utilisés :

Projection polaire ou équidistante : ce type de projection considère que l'inclinaison θ d'un objet situé sur la voûte est directement proportionnelle à la distance radiale d du centre de l'image de rayon r : $\theta / (\pi/2) = d/r$. Cette relation est représentée par des cercles concentriques équidistants sur l'image plane (fig. 3.6).

Projection orthographique : la relation entre la position angulaire θ et sa position radiale correspondante est donnée par la relation suivante : $d = r \sin \theta$. Cette relation est représentée par des cercles concentriques dont l'écart radial est de plus en plus petit, en allant du centre vers l'horizon (fig. 3.7). Les cercles externes sont fortement tassés et inexploitable.

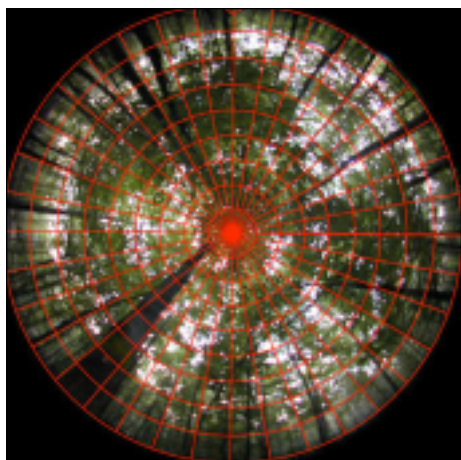


Fig.3.6. Grille équidistante (polaire)

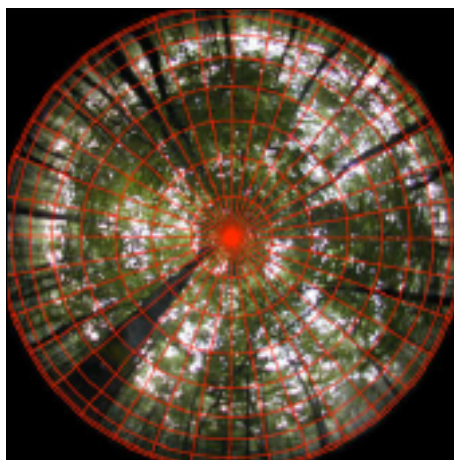


Fig.3.7. Grille orthographique

Les fractions de trouées utilisées dans le calcul de l'indice foliaire sont déterminées pour chaque portion de l'hémisphère. Les coordonnées angulaires (inclinaison et azimut) de chacune des fractions de trouées sont données par le type de projection de l'objectif utilisé. La détermination de la géométrie de la projection

utilisée par l'objectif est donc fondamentale. Le choix d'une grille inadaptée constitue une source d'erreur importante car la distribution, la forme et la taille des trouées sont modifiées (Frazer et al, 1997). Les objectifs sont généralement calibrés par le fabricant ou par la société commercialisant le système d'acquisition de photographies hémisphériques.

2.56.2. Acquisition et traitement des photographies hémisphériques sous forêts

La prise de vue hémisphérique est réalisée à l'aide d'un boîtier photographique muni d'un objectif fish-eye. L'appareil est monté sur un trépied. Il est orienté vers le nord magnétique à l'aide d'une boussole. L'horizontalité est contrôlée à l'aide d'un niveau à bulle. Un retardateur ou un déclencheur souple, accordé au boîtier, permet de garder la bonne stabilité de l'appareil lors de la prise de vue. Lorsque les photographies hémisphériques sont prises à des niveaux très bas (sous fougères, par exemple), l'appareil doit être muni d'un retardateur. Une fois la prise de vue déclenchée, l'opérateur doit s'éloigner pour ne pas apparaître sur la photographie. Les prises de vue sont réalisées par ciel couvert homogène afin d'éviter le flou dû aux réflexions par le feuillage et les taches solaires. Elles peuvent être réalisées en nombre limité au lever ou au coucher du soleil. Pratiquement, ces conditions d'éclairement optimales sont relativement proches de celles recherchées avec l'analyseur de couvert LAI-2000. L'acquisition des clichés est relativement longue, car elle nécessite la mise en place du pied photo, le réglage de l'horizontalité de l'appareil, son orientation. La prise de 24 clichés nécessite environ 1 heure.

Afin d'éviter les effets de bordure, les photographies sous forêts doivent être réalisées à une distance suffisante des lisières. La distance conseillée est de deux fois à trois fois la hauteur des arbres dans des forêts matures (Grégoire Himmler, 1992).

Lorsqu'il s'agit d'un appareil non numérique, le film noir et blanc offre de meilleures possibilités de séparation entre le ciel et la végétation. Il doit être lent ou de moyenne rapidité (25 à 100 ISO). Ces films ont pour avantage de posséder des grains de bromure d'argent fins permettant une bonne résolution. L'exposition correcte est déterminée en utilisant un posemètre, indépendant ou intégré au boîtier photographique. A une même exposition correspondent plusieurs couples diaphragme/vitesse. Le diaphragme détermine la profondeur de champ qui, dans une photographie, conditionne la netteté des éléments depuis le premier plan, constitué par les parties basses du couvert, jusqu'à l'arrière-plan, constitué du ciel et de la couronne supérieure des arbres. La profondeur de champ croît lorsque le diaphragme se ferme. Pour les forêts hautes, un diaphragme de $f/5,6$ est souvent employé. Pour les forêts basses ou à sous-étages, un diaphragme plus fermé est nécessaire afin de tenir compte des couches de végétation les plus basses. La vitesse d'obturation a une moindre importance, lorsque les photographies hémisphériques sont réalisées en vent faible et avec l'appareil monté sur trépied. Dans le cas d'un vent fort, les photographies peuvent être réalisées pendant les courtes périodes d'accalmie et en employant des vitesses rapides sans compromettre la profondeur de champ. Notons néanmoins, que ces films, sous des conditions de faible lumière (sous forêts fermées), nécessitent une pose plus longue et l'emploi d'une grande ouverture de diaphragme, donc une moindre

profondeur du champ. Une pose longue a pour effet d'induire un flou dû au bougé. Il est conseillé de mesurer l'exposition à chaque prise de vue.

La première phase de traitement consiste à extraire les fractions de trouées. Sur la photographie numérisée, l'extraction des fractions de trouées nécessite la détermination d'un seuil de gris qui permet de séparer le ciel de la végétation. Le choix du seuil est difficile et constitue la source d'erreur la plus importante. La surestimation du seuil se traduit par une surestimation des fractions de trouées et donc une sous-estimation de l'indice foliaire.

Lors du choix du seuil, il est conseillé de se référer aux petites trouées. Un seuil sous-estimé a pour effet l'obstruction des petites trouées et l'utilisateur peut facilement détecter cet effet. Au contraire, il est beaucoup plus difficile de détecter un seuil surestimé.

Il est important de signaler que, même acquise sous un ciel couvert et homogène, la photographie hémisphérique présente des zones de transition entre le ciel et la végétation, surtout au niveau des larges trouées. Une atténuation du contraste et une uniformisation des teintes se manifestent lorsqu'on passe du centre de l'image, bien éclairé, à la périphérie, de plus en plus assombrie par une végétation de plus en plus épaisse. La photographie en fausse couleur (*photo 3.19*) met en évidence les différences de luminosité entre le centre et les bords de l'image et dans les zones de transition entre le ciel et la végétation. C'est au niveau de cette zone que les erreurs de seuillage peuvent être commises. Ces erreurs sont d'autant plus importantes que les trouées sont larges.



Photo 3.18.
Photographie hémisphérique noir et blanc.

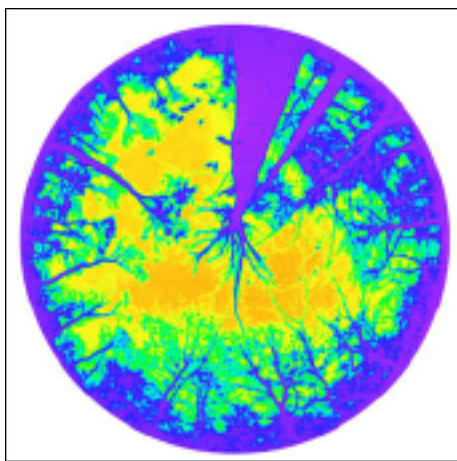


Photo 3.19.
Photographie hémisphérique en fausse couleur.

Dans des telles conditions, il faut éviter d'appliquer un seuil unique à la totalité de l'image. Certains logiciels tels que GLA ou Photoshop offrent la possibilité de seuillage par zone. Une autre procédure, proposée par Walter J-M. (Université Louis Pasteur, Faculté des sciences de la vie, Strasbourg), consiste à appliquer un filtre avant le seuillage de la photographie numérisée en niveau de gris (Walter, communication personnelle). Ce filtre permet d'accentuer la netteté des contours

entre le ciel et la végétation, facilitant ainsi le seuillage. Ce filtre, publié par Kucharik *et al.* (1997), est le suivant :

-1	-1	-1
-1	12	-1
-1	-1	-1

Il peut être implanté sous Paint Shop Pro ou Photoshop avec diviseur égal à 4.

Outre les problèmes relatifs au seuillage des photographies, la superposition de la grille hémisphérique à la photographie, pour l'extraction des fractions de trouées, s'effectue à l'aide de repères. Les limites du disque hémisphérique sont rarement visibles et un mauvais positionnement de la grille peut générer des erreurs. Delta-T Devices (Cambridge, England) et Régent instruments (Québec, Canada) commercialisent un système de positionnement permettant de s'affranchir de ce problème. L'appareil photographique est monté sur un support à contre poids permettant d'assurer automatiquement la verticalité de l'axe optique. Ce support est muni de deux diodes produisant des points lumineux visibles sur le négatif et matérialisant le pourtour du disque hémisphérique. Ces points permettent un positionnement parfait de la grille et un gain de temps appréciable lors de la mise en station.

Signalons qu'en format numérique, l'objectif fish-eye NIKON FC E8 adapté aux boîtiers NIKON série CoolPix (900, 950, 990), permet l'acquisition de photographies hémisphériques numériques à des résolutions allant jusqu'à 2 048 x 1536 pixels pour le boîtier NIKON CoolPix 990. La projection théorique de l'objectif NIKON FC E8 est polaire.

2.6.3. Systèmes d'acquisition et de traitement des photographies hémisphériques

De nombreuses firmes commercialisent des dispositifs complets d'acquisition, de traitement et d'analyse de photographies hémisphériques. Certains laboratoires de recherches forestières ont développé des logiciels de traitement de photographies hémisphériques. Ces logiciels sont distribués gratuitement.

2.6.3.1. SCANOPY DIGITAL CAMERAS : Canopy Analysis with digital Fisheye Imaging

REGENT INSTRUMENTS INC.
4040 rue Blain, Québec, Qc.
G2B 5C3 CANADA
Tél. : (418) 840-1347 • Fax : (418) 840-1350
Site internet : www.regent.qc.ca

Le système REGENT est composé de :

- 1• Un appareil photographique numérique avec un objectif calibré. L'appareil est monté sur un système d'auto-positionnement permettant d'assurer l'horizontalité du boîtier photographique et donc la verticalité de l'axe optique.
- 2• WinSCANOPY est le logiciel de traitement de photographies hémisphériques commercialisé par la même firme. Il est conçu pour fonctionner sous Windows 95,

g8 et NT et il est commercialisé en trois versions Basic, Regular et Pro. Ces trois versions se distinguent par les options offertes. Signalons que la version Basic permet uniquement d'estimer le climat lumineux sous couvert et n'offre donc pas la possibilité de calcul de l'indice foliaire.

L'interface utilisateur de ce logiciel est conviviale. Deux méthodes de séparation entre le ciel et la végétation, lors de l'estimation des fractions de trouées, sont possibles : un simple seuillage sur l'ensemble de l'image numérisée et une méthode de classification basée sur les couleurs et ayant pour principal avantage "théorique" une meilleure séparation des différents composants de l'image (ciel, végétation chlorophyllienne et parties corticales).

Une fois traitées, les résultats sont sauvegardés en format ASCII, transférable sur d'autres plates-formes ou autres logiciels d'analyse et de présentation.

2.6.3.2. Système HemiView

DELTA-T DEVICES LTD

128 Low Road, Burwell, Cambridge, CB50EJ-England

Tél. : 01638 742 922 • Fax: 01638 743 155

Site internet : www.delta-t.co.uk

Il s'agit d'un système complet d'acquisition et de traitement de photographies hémisphériques. Ce système comprend un appareil photographique, numérique ou papier, muni d'un objectif fish-eye. Une plate forme à balançoires permet l'autopositionnement du boîtier photographique. Cette plate-forme est aussi munie de deux photodiodes qui génèrent des marques optiques sur la photographie hémisphérique acquise. Ces marques correspondent à deux points cardinaux et facilitent le positionnement et l'orientation de la photographie numérisée. Rappelons que l'orientation de la photographie est primordiale lorsqu'on souhaite étudier le climat lumineux à partir de photographies hémisphériques. Cette plate-forme est aussi munie d'une boussole qui facilite l'orientation de l'appareil.

Le logiciel d'analyse de photographies hémisphériques numérisées HemiView est conçu pour un environnement Windows et Windows NT. Les formats d'image supportés par ce logiciel sont nombreux : BMP (1, 4, 8, 16, 24 bits), JPEG (24 bits), PC Paintbrush PCX (1, 4, 8, 16, 24 bits), TIFF (1, 8, 24 bits non compressé), Targa TGA (8, 16, 24 bits), Photo CD (8, 24 bits). Comme la plupart des logiciels pour Windows, il offre la possibilité de multi-fenêtrage lors de l'affichage.

Les informations structurales fournies par HemiView sont diverses et concernent l'indice foliaire, la distribution angulaire des fractions de trouées, la distribution des angles d'inclinaison foliaire et de l'angle foliaire moyen, ainsi que des données relatives au climat lumineux.

2.6.3.3. Système CI-110 DIGITAL CANOPY IMAGER

CID Inc.

4018 NE 112 TH AVE SUITE D-8, VANCOUVER, WA 98682, USA

Tél. : 360 254 7874 • Fax : 360 254 7923

Site internet : www.cid-inc.com

Description



Photo 3.20. CI-110 Digital Plant Canopy Imager.

Poids : 3 kg. Dimensions du manche : 20 x 20 x 400 mm ou de 20 x 20 x 800 mm.



Photo 3.21. Objectif fish-eye monté sur un système d'autopositionnement spécialement conçu pour des applications forestières (Source : cid-inc.com).

Le CI-110 est un système d'acquisition de photographies hémisphériques couleur de 150° d'angle de vue. Les images sont acquises à une résolution de 640 x 480 en format standard BMP. La durée d'une prise de vue est de 1/100 de seconde. Un ordinateur (initialement de type Toshiba Libretto 100 CT, Pentium, 32 MB RAM, 2.1 G de disque dur) muni d'un programme (sous Windows 95, 98, ME ou 2000) permet de traiter en temps réel l'image hémisphérique acquise. Notons que ce type d'ordinateur n'est plus commercialisé et qu'un modèle équivalent équipé d'un port USB peut le remplacer. Toutefois, il est conseillé de ne pas l'utiliser pour d'autres applications que le pilotage du CI-110 (CID, communication personnelle). Les images peuvent être aussi exportées et traitées au laboratoire par tout logiciel de traitement de photographies hémisphériques.

L'optique fish-eye (dont nous n'avons pas testé la qualité) est montée sur un système auto-nivelant permettant de maintenir l'optique horizontale. L'ensemble (optique + système auto-nivelant) mesure environ 10 cm de haut, ce qui ne permet pas de réaliser des mesures au niveau du sol. Les images acquises sur le terrain sont visualisées directement à l'écran. Les images sont ensuite sauvegardées en format .bmp.

Le logiciel de traitement fourni permet à l'utilisateur de choisir le nombre d'angles zénithaux (de 1 à 10) et de divisions azimutales (de 1 à 10) qu'il souhaite pour définir une grille sur l'image hémisphérique acquise. L'opérateur peut définir aussi une zone à masquer sur l'image (opérateur visible, objet indésirable). Le logiciel d'analyse du Ci-110 fournit les mesures suivantes :

- le coefficient de transmission du rayonnement (gap fraction), calculé selon la procédure d'inversion proposée par Norman et Campbell (1989),
- la coefficient de rayonnement diffus transmis,
- l'indice foliaire,
- l'angle moyen d'inclinaison foliaire,

- la distribution du feuillage,
- le coefficient d'extinction du couvert.

L'équipement comporte également un cache qui se positionne sur la lentille hémisphérique et qui permet, d'après le constructeur, la mesure du PAR (rayonnement photosynthétiquement actif). Nous n'avons pas testé cette option et nous ne connaissons pas la qualité de la mesure de rayonnement ainsi réalisée.

2.6.4. Logiciels de traitement de photographies hémisphériques

GLA Gap light Analyser

Gordon W. Frazer

School of Resource and Environmental Management, Simon Fraser University.

8888 UNIVERSITY DRIVE, Burnaby, British Columbia, CANADA V5A 1S6

Charles D. Canham

Institute of Ecosystem Studies

P.O. Box AB, Millbrook, New York, 12545, U.S.A

GLA est un logiciel de traitement de photographies hémisphériques couleur ou noir et blanc. Il a été mis au point par G.W. Frazer et C.D. Canham. Il offre de nombreux outils permettant d'extraire diverses informations relatives à la structure du couvert et du climat lumineux. Ce logiciel, très complet, a été réalisé dans le cadre d'un projet financé par le gouvernement canadien. Le logiciel GLA, ainsi que le code source (langage C++) et le manuel d'utilisation, sont distribués gratuitement et peuvent être téléchargés à partir du site Internet :

<http://www.rem.sfu.ca/forestry/download/download.htm>

ou demandés aux auteurs.

Afin de disposer d'un équipement économique permettant l'acquisition et le traitement de photographies hémisphériques, on préconise de disposer de ce logiciel car il est à la fois gratuit, complet et facile à utiliser. L'acquisition de photographies hémisphériques peut être réalisée, de préférence, à l'aide du boîtier NIKON CoolPix 990 muni de l'objectif NIKON FC E8. Ce système, pour un coût d'environ 10 000 FF [1 524 €] (TTC), peut remplacer les systèmes commercialisés actuellement.

WINPHOT

Hans ter Steege, 1997

Tropenbos-Guyana Programme, 12 E Garnett Street, Campbellville, Guyana

Tél./Fax : +592 2 62846

Winphot est un logiciel de traitement de photographies hémisphériques développé par Hans Ter Steege (1997) en collaboration étroite avec d'autres chercheurs, dans le cadre du programme Tropenbos-Guyana. Ce logiciel est distribué gratuitement (Ter Steege, communication personnelle). Il est conçu pour fonctionner sur des PC compatibles IBM sous Windows 3.1 ou plus. Les formats d'images supportés par ce logiciel sont seulement le PCX et le BMP avec des résolutions de 1, 4 et 8 bits par pixel, soit respectivement 2 (noir et blanc), 16 et 256 couleurs. Notons aussi que la taille des images ne doit pas dépasser 1 024 x 1 024 pixels. Seule la projection équidistante est admise (voir 2.5.1). Rappelons que cette projection est caractérisée par une grille de discrétisation constituée de cercles équidistants sur l'image plane hémisphérique. Le positionnement de la grille est jugée visuellement et le seuillage est unique.

Conclusion

Les différentes méthodes, directes et indirectes, ont fait l'objet de nombreux travaux de validation. La méthode de collecte de litière est, par excellence, la méthode de référence d'estimation de l'indice foliaire en forêts feuillues caducifoliées. Les méthodes allométriques constituent les seules méthodes directes d'estimation de l'indice foliaire en forêts résineuses. Ces méthodes sont relatives au site pour lequel elles ont été établies. Elles sont sensibles aux conditions climatiques, à l'âge et à la densité du couvert. Elles ont pour inconvénients d'être laborieuses, longues et de n'offrir que peu de possibilités pour le suivi temporel du couvert forestier comme la phénologie, les effets de stress hydrique, des variations du rayonnement ou des attaques parasitaires. Les méthodes indirectes permettent de pallier ces inconvénients. Elles utilisent des mesures d'interception de rayonnement ou des instruments tels que le Demon (CSIRO, Centre of Environment Mechanics, Australia), le LAI-2000 (Li-cor Inc., Lincoln, USA), le SunScan (Delta-T Devices, UK) et les photographies hémisphériques. Elles estiment l'indice foliaire en inversant les fractions de trouées mais ont pour inconvénients de reposer sur de nombreuses hypothèses, dont la distribution aléatoire des éléments foliaires au sein du couvert. Cette hypothèse est peu réaliste dans des couverts forestiers, souvent hétérogènes et discontinus. Rappelons que de toutes ces méthodes, seul le SunScan fournit d'origine un signal calibré dans le PAR, les autres capteurs et les photographies ne fournissant que des indices, utilisés pour calculer une transmittance ou une fraction de trouées. Ces méthodes indirectes ont aussi l'inconvénient de fournir un indice foliaire total contenant à la fois l'indice foliaire proprement dit et un indice de bois relatif aux parties corticales (troncs, branches et rameaux). En revanche, elles ont pour avantages d'être rapides et bien adaptées au suivi dynamique de la structure des couverts forestiers. L'acquisition directionnelle du DEMON permet une mesure du rayonnement incident fréquente dans n'importe quelle petite trouée, ce qui constitue un avantage certain en forêt. L'acquisition hémisphérique, qui caractérise le LAI-2000, le CI-110 et les photographies hémisphériques, est d'un grand intérêt lorsqu'une appréhension fine de l'organisation spatiale de la végétation est souhaitée. Les photographies hémisphériques constituent une cartographie du couvert. Elles sont archivables et se prêtent à la photo-interprétation et à des analyses quantitatives. Les informations structurales fournies par ces méthodes (indice foliaire, distribution angulaire des fractions de trouées, distribution des angles d'inclinaison foliaire, etc.) peuvent être utiles pour satisfaire des préoccupations diverses. Toutefois, ces méthodes ne permettent pas une quantification directe de l'énergie radiative qui atteint le sol. Si cette information est recherchée, les mesures d'interception de rayonnement seront préférées, dans une longueur d'onde à définir (pyranomètre dans le rayonnement global, capteur de PAR y compris SunScan ...) ou un effort supplémentaire d'étalonnage sera nécessaire.

Outre les méthodes directes et indirectes *in situ*, de nombreux travaux ont tenté d'appréhender les paramètres structuraux du couvert, en particulier l'indice foliaire, à partir des données de télédétection. Le chapitre suivant concerne les potentialités offertes par la télédétection pour l'étude des couverts forestiers.

Chapitre 4

Potentialités offertes par la télédétection pour l'étude de la structure des canopées forestières

Introduction

La télédétection est une technique qui permet, à l'aide d'un capteur, d'observer et d'enregistrer le rayonnement électromagnétique, émis ou réfléchi, par une cible quelconque. Les longueurs d'onde employées en télédétection sont essentiellement : le visible de 400 à 700 nm, le proche infrarouge de 700 à 1 500 nm, l'infrarouge moyen de 1 500 à 3 000 nm, l'infrarouge thermique de 3 000 à 15 000 nm et les hyperfréquences ou micro-ondes, passives et actives, de 1 millimètre au mètre (fig. 4.1) :

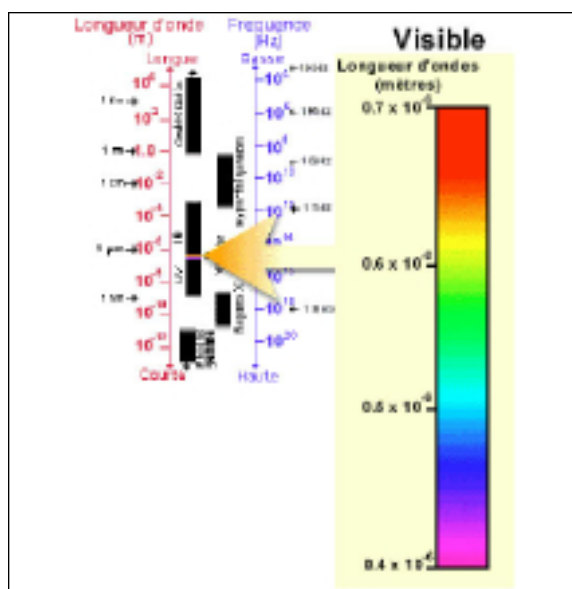


Fig. 4.1. Spectre électromagnétique (source : Centre canadien de télédétection).

La télédétection est dite passive lorsque la source illuminant la cible est indépendante du capteur. Généralement cette source est le soleil. C'est le cas des satellites *SPOT* (Satellite pour l'Observation de la Terre), *LANDSAT* (Land Satellite) (fig. 4.2), *METEOSAT* (Meteorological Satellite), etc. La télédétection est dite active dans le cas contraire. C'est le cas du *LIDAR* (Light Detection and Ranging) utilisant une source laser et du *RADAR* (Radio Detection And Ranging) utilisant un émetteur hyperfréquence. La figure 4.3 illustre une image RADAR acquise par le satellite *ERS-1* (European Remote Sensing Satellite). L'un des principaux avantages de la télédétection active est la possibilité de réaliser des acquisitions en tout temps, par ciel clair ou nuageux, et de jour comme de nuit.

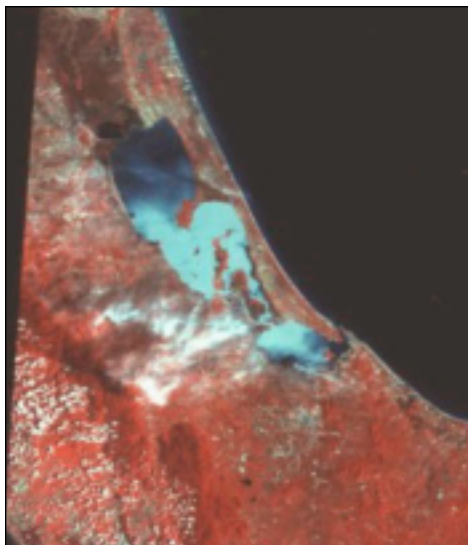


Fig. 4.2. Image Landsat Thematic Mapper
(Source :National Research Council of Thailand)

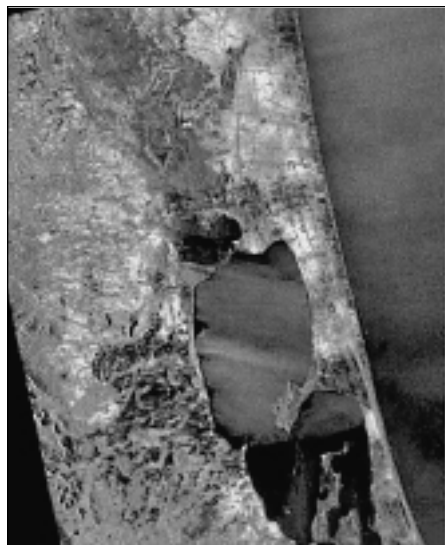


Fig.4.3. Image Radar ERS-1
(Source :National Research Council of Thailand)

Les plates-formes utilisées en télédétection sont diverses (au sol, ballons, avions et satellites). Les satellites d'observation en orbite autour de la terre sont essentiellement de trois types (Bonn et Rochon,1992) :

1. L'orbite géostationnaire est une orbite équatoriale et circulaire à une altitude d'environ 36 000 km. Le satellite se déplace à la même vitesse angulaire et dans le même sens que la terre, assurant ainsi une observation permanente de la même région. C'est le cas des satellites de télécommunication et d'observation météorologique tel que les satellites *METEOSAT* et *GOES* (Geostationary Operational Environmental Satellite).
2. L'orbite héliosynchrone est une orbite circulaire où le plan de l'orbite du satellite est déterminé de manière à observer régulièrement un point particulier à la même heure locale solaire. C'est le cas des satellites *LANDSAT* et *SPOT*. L'altitude relativement basse de ces satellites (300 à 1 500 km) permet des bonnes résolutions au sol.
3. L'orbite circulaire quelconque, qui offre l'avantage de passer à la même altitude au-dessus d'un point de la terre mais à des heures différentes. C'est le cas des satellites *ERS-1* et *ERS-2*.

Trois types de résolution caractérisent un capteur de télédétection, au sol ou embarqué :

1. La résolution spectrale correspondant aux bandes de longueurs d'onde auxquelles les capteurs sont sensibles (*SPOT panchromatique* dans la bande visible 510-730 nm, *SPOT XS canal vert* 500-590 nm, *canal rouge* 610-680 nm et *canal proche infrarouge* 790-890 nm ; *Radar ERS-1* Micro-onde bande C 5 GHz ; *JERS-1* (Japanese Earth Resources Satellite) bande L 1.28 GHz, etc.). Les images suivantes de la forêt de Haguenau (juillet 1998) ont été acquises à différentes longueurs d'onde avec une résolution au sol de 2 m à l'aide du radiomètre Push broom,

embarqué sur l'avion ARAT (Avion de Recherche Atmosphérique et de Télédétection) du CNES (fig. 4.4 à 4.6) (Soudani *et al.*, 2002).

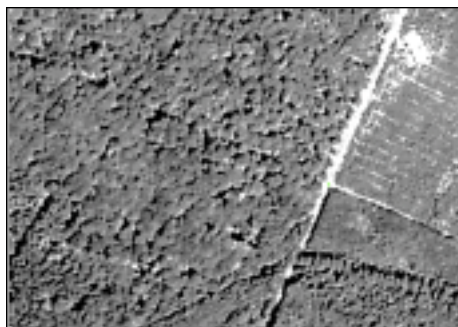


Fig.4.4. Image aéroportée ARAT capteur *push broom* canal vert 500-590 nm.

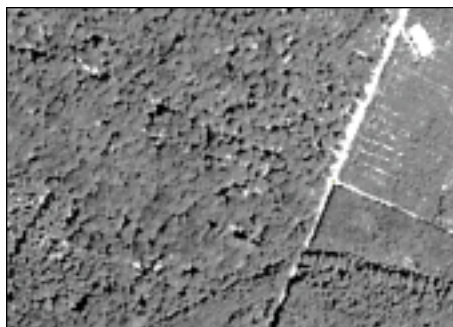


Fig. 4.5. Image aéroportée ARAT capteur *push broom* canal rouge 610-680 nm.

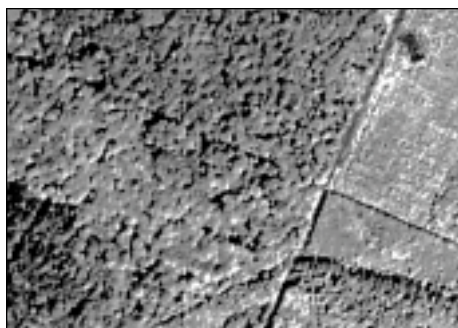


Fig. 4.6. Image aéroportée ARAT capteur *push broom* canal proche infrarouge (790-890 nm).



Fig.4.7. Image composition colorée RVB canal 3 Rouge, canal 2 Vert, canal 1 Bleu.

Sur la composition de la figure 4.7, en réalité colorée, les espèces feuillues apparaissent dans des teintes rouges, les résineux dans des teintes bleutées sombres et le minéral (sol et autres) en bleu clair. Notons aussi les variations de niveaux de gris en fonction des entités du paysage sur les images mono-spectrales.

2. La résolution spatiale correspondant à la surface élémentaire d'échantillonnage observée par le capteur. Cette surface élémentaire correspond au pixel (picture element). Il est de 10 m x 10 m pour la bande panchromatique de SPOT, 20 m x 20 m pour les bandes XS, 30 m x 30 m pour *LANDSAT Thematic Mapper*, 1 km x 1 km pour *NOAAH-AVHRR* (National Oceanographic and Atmospheric Administration, Advanced Very High Resolution Radiometer), 30 m x 30 m pour *ERS-1* et 18 m x 18 m pour *JERS-1*.

La largeur de la bande balayée, le long d'un parcours correspondant à la trace du satellite, définit la fauchée au sol. Elle est de 60 km pour SPOT, 185 km pour Landsat TM, 2800 km pour *NOAA-AVHRR*, 100 km pour *ERS-1* et 75 km pour *JERS-1*.

La figure 4.8 correspond à trois images d'un même peuplement feuillu de la forêt de Haguenau (parcelle N° ONF 1054) acquises à la même date (juillet 1998) : une photographie aérienne et deux images acquises dans les mêmes longueurs d'onde mais à deux résolutions spatiales différentes.

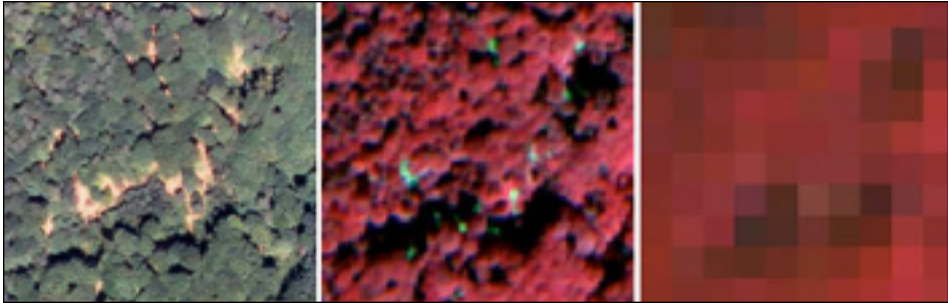


Fig. 4.8. De gauche à droite : photographie aérienne ; composition colorée à une résolution de 2 m x 2 m (ARAT Push broom-CNES) ; composition colorée *SPOT* à une résolution de 20 m x 20 m (Soudani *et al.*, 2002).

3. La résolution temporelle ou répétitivité correspond à la période entre deux acquisitions de la même scène. Cette résolution ne dépend pas du capteur mais de l'orbite et du mode de manœuvre du satellite. Notons que le satellite *SPOT* offre la possibilité de viser un site sur commande permettant ainsi d'assurer une excellente résolution temporelle. Sans manœuvre, la résolution temporelle de *SPOT* est de 26 jours, 16 jours pour *LANDSAT TM* et 14,5 jours pour *NOAA-AVHRR*. Le tableau 4.1. donne quelques caractéristiques des principaux satellites d'observation de la terre.

Tab. 4.1. Caractéristiques de quelques satellites d'observation de la terre.

	Landsat-5	SPOT	ERS	JERS-1	NOAA-12,14
Date de lancement	USA 1984	France SPOT-1 Fév. 1986 SPOT-2 Janv. 1990 SPOT-3 Sept. 1993 SPOT-4 Mars 1998	Europe Juil.1991 (ERS-1) Jusqu'à juin 1996 Avril 1995 (ERS-2)	Japan Février 1992	USA Mai 1991 (NOAA-12) Déc. 1994 (NOAA-14)
Altitude	705 km	832 km	782-785	586 km	833 km (NOAA-12) 870 km (NOAA-14)
Durée d'une révolution	99 min	101 min	100 min	96 min	102 min (NOAA-12) 101 min (NOAA-14)
Répétitivité	16 jours	26 jours 1-3 jours en programmation	3,35 et 168 jours (ERS-1) 35 jours (ERS-2)	144 jours	14,5 jours
Capteurs	Thematic Mapper 0,45-0,52 µm TM1 0,52-0,60 µm TM2 0,63-0,69 µm TM3 0,76-0,90 µm TM4 1,55-1,75 µm TM5 10,4-12,5 µm TM6 2,10-2,35 µm TM7	HRV (High resolution visible) 0,50-0,59 µm XS1 0,61-0,69 µm XS2 0,79-0,90 µm XS3 0,51-0,73 µm P 1,5-1,75 µm MIR (Infrarouge moyen sur SPOT-4)	Altimètre radar Diffusomètre vent Sondeur hyperfréquences Capteur Infrarouge	SAR (Synthetic Aperture Radar) OPS (Optical Sensor)	AVHRR (Advanced Very Hight Resolution Radiometer) 0,55-0,68 µm 0,73-1,10 µm 3,33-3,93 µm 10,50-11,50 µm 11,00-12,50 µm
Résolution spatiale	30 m	10 m P 20 m XS	30 m SAR	18 m (SAR), 18,3 x 24,2 m (OPS)	1,1 km
Fauchée au sol	185 km	60 km	100 km (SAR)	75 km	2 800 km

Le champ d'application de la télédétection pour l'étude de la végétation est très vaste. Les acquisitions ont été utilisées dans maintes études : description, identification et cartographie de la végétation et de l'occupation du sol (Norwinne et Gregor, 1983 ; Tucker *et al.*, 1985 ; Goward *et al.*, 1985), déforestation tropicale (Malingreau *et al.*, 1989), LAI, photosynthèse et évapotranspiration, biomasse (Asrar *et al.*, 1984, 1985 ; Clevers, 1989 ; Gamon *et al.*, 1995), productivité des systèmes agricoles (Choudhury, 1987 ; Seguin *et al.*, 1992), phénologie forestière (Muller, 1995), coupes et régénération, défoliation des conifères à l'est du Canada, dépérissement des érables en Amérique du Nord (Bonn, 1996), défoliation foliaire des chênaies de la forêt de Haguenau suite aux attaques du *Bombyx disparate* (Deshayes *et al.*, 1997).

La télédétection des couverts forestiers pose des problèmes particuliers liés à l'hétérogénéité du milieu. En télédétection passive optique, les propriétés optiques d'un couvert forestier résultent des effets de ses différentes composantes, photosynthétiques et corticales (branches et troncs), et du sol sous-jacent, couvert ou non par une végétation herbacée. En télédétection active en hyperfréquences, le signal radar rétrodiffusé (réfléchi dans la direction de l'antenne de réception) est essentiellement conditionné par les propriétés géométriques et la teneur en eau du couvert et du sol.

1. Propriétés optiques de la végétation et du sol

Dans cet exposé, on se référera, plus particulièrement, aux travaux de synthèse de Guyot (1989), Guyot *et al.* (1989), Baret et Guyot (1991) et Soudani (1999). On distinguera entre les propriétés optiques des feuilles et du sol, et les propriétés optiques du couvert végétal.

1.1. Propriétés optiques des feuilles

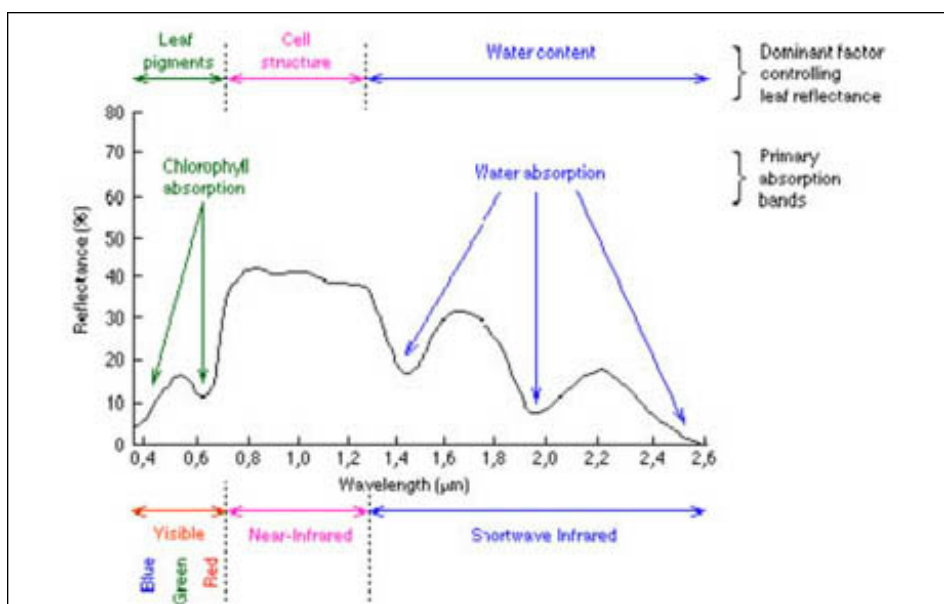


Fig.4.9. Propriétés optiques des feuilles (d'après Hoffer, 1978, Centre canadien de télédétection).

Visible 400-700 nm : dans le visible, les propriétés optiques des feuilles sont fortement conditionnées par la pigmentation foliaire, xanthophylle, carotène, antocyanes, et tout particulièrement les chlorophylles a et b (Guyot, 1989). On distingue deux bandes de faible réflectance et de forte absorption, dans le bleu (450 nm) et dans le rouge (670 nm, canal *XS2 SPOT*), provoquées par les chlorophylles a et b. Entre ces deux bandes, se situe un pic de réflectance autour de 550 nm (vert-jaune, canal *XS1 SPOT*).

Proche infrarouge 700-1300 nm : dans le proche infrarouge, les propriétés optiques sont affectées par la structure interne de la feuille. On observe une faible absorption et des fortes réflectance et transmittance. Pour cette bande, les pigments foliaires et la cellulose, qui constituent les parois cellulaires, sont transparents et induisent une faible absorption (10 % maximum). La réflectance et la transmittance sont pratiquement similaires. La réflectance (50 % maximum) atteint un plateau dont le niveau est lié à la structure anatomique des feuilles. Celui-ci est d'autant plus élevé que les feuilles présentent une structure cellulaire irrégulière, une composition hétérogène et un nombre d'assises cellulaires important (Guyot, 1989).

Infrarouge moyen 1300-2500 nm : dans la bande infrarouge moyen, on distingue essentiellement les bandes d'absorption de l'eau, centrées sur 1450 nm, 1950 nm et 2500 nm. Les pics de réflectance sont à 1650 nm et 2200 nm (canaux 5 et 7 du satellite *Landsat TM*).

De nombreux facteurs (structure interne des feuilles, âge, teneur en eau, déficiences minérales et état sanitaire des feuilles) sont à l'origine des perturbations de ces propriétés (Guyot, 1989) :

1. La taille des cellules et l'épaisseur relative du parenchyme lacuneux conditionnent la réflectance dans le proche infrarouge. Les feuilles épaisses sont généralement plus réfléchissantes que les feuilles fines. Notons aussi que pour une même espèce, les feuilles de lumière sont plus épaisses et plus réfléchissantes que les feuilles d'ombre.
2. L'âge des feuilles affecte indirectement les propriétés optiques, car il influence la structure et la composition des feuilles. Ses effets sont généralement liés à des variations de la concentration chlorophyllienne. Au cours de la saison de végétation dans les forêts de feuillus, des variations phénologiques sont visibles. La diminution de la concentration chlorophyllienne, à la fin de la saison de végétation, a pour effet une forte diminution de l'absorption et un accroissement de la réflectance dans le jaune-vert et dans le rouge. Dans le proche infrarouge, l'évolution est uniquement visible lorsque la structure interne des feuilles se trouve modifiée. Chez les conifères, la réflectance des aiguilles diminue lorsque l'âge augmente. Cette diminution est provoquée par l'augmentation de la concentration chlorophyllienne et la structure interne des aiguilles, qui devient de plus en plus dense (Guyot et al., 1989).
3. Les effets de la teneur en eau se manifestent dans toutes les bandes spectrales. Une diminution de la teneur en eau a pour effet une augmentation de la réflectance. Elle est beaucoup plus importante dans l'infrarouge moyen que dans le visible et le proche infrarouge.
4. Les déficiences minérales affectent les propriétés optiques car elles influencent la structure et la composition des feuilles. Une diminution de la nutrition azotée se

traduit par une diminution de la concentration chlorophyllienne, ayant pour effet une augmentation de la réflectance dans le visible.

5. Les effets de l'état sanitaire dépendent de la nature des manifestations (dessèchement et chute foliaire, changement de pigmentation, etc.).

De nombreux travaux ont permis de construire des modèles destinés à prédire le comportement optique des feuilles suivant les caractéristiques anatomiques, les caractéristiques de surface, la teneur en eau et en pigmentation foliaire. Brièvement, on distingue globalement quatre catégories de modèles (Jacquemoud et Ustin, 2001) :

1. les modèles de lancer de rayon sont basés sur une description détaillée et une modélisation tridimensionnelle de la structure anatomique de la cellule et de la feuille et simulent la propagation de photons dans ce milieu en utilisant les lois de réflexion, de réfraction et d'absorption. Il s'agit de modèles à la fois géométriques et optiques. Tel est le cas du modèle RAYTRAN, développé par l'Institut des Applications Spatiales (IAS, Jacquemoud *et al.*, 1997).

2. les modèles à N flux basés sur la théorie de Kubelka-Munk. Ces modèles décrivent les différents flux montants et descendants où la feuille est considérée comme une ensemble de couches absorbantes et diffusantes. Chaque couche est caractérisée par un coefficient de diffusion et un coefficient d'absorption qui sont conceptuellement associés à la composition de la feuille (cellules plus ou moins absorbantes).

3. Les modèles d'empilement de couches. La feuille est divisée en N couches, séparées par des espaces d'air. Dans cette catégorie de modèles, on cite le modèle PROSPECT (Jacquemoud et Baret, 1990). Il s'agit d'un modèle de transfert radiatif permettant de calculer la réflectance et la transmittance hémisphériques des feuilles vertes dans des longueurs d'onde allant de 400 à 2500 nm. Les paramètres d'entrée de ce modèle sont : le paramètre N caractérisant la structure anatomique foliaire (de 1 à 3), la concentration en chlorophylles a et b, la teneur en eau, en protéine, en cellulose et en lignine (*fig. 4.10*).

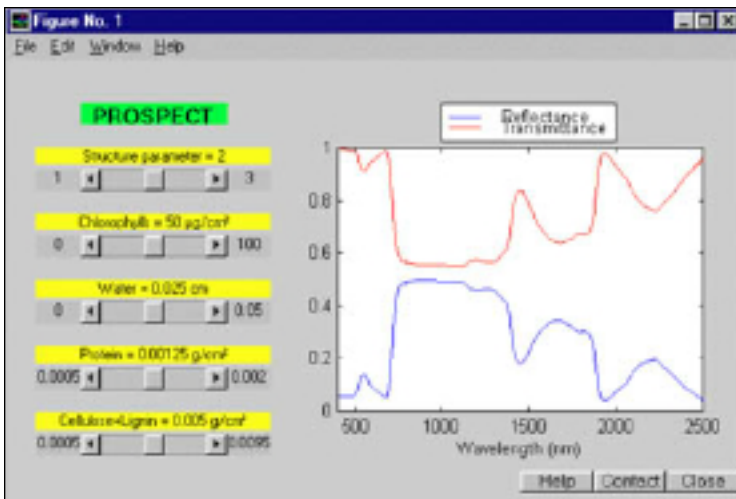


Fig.4.10. Modèle PROSPECT de Jacquemoud et Baret (1990)
(http://www.diderotp7.jussieu.fr/Led/LED_prospect_f.htm).

4. D'autres modèles simulant le transfert radiatif au sein d'une feuille ont été aussi développés. On cite, par exemple, le modèle de Dawson *et al.* (1998) conçu pour simuler les propriétés optiques des aiguilles de pin fraîches ou sèches. Les entrées de ce modèle sont illustrées par la figure 4.11 :

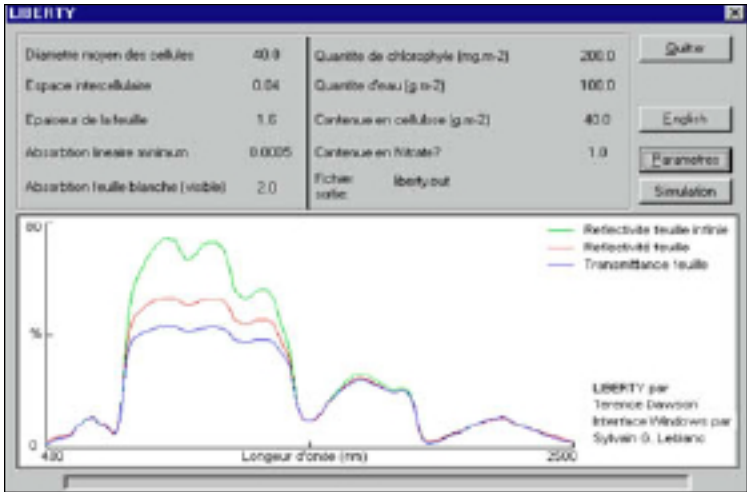


Fig. 4.11. Modèle LIBERTY pour les aiguilles de conifères (Dawson *et al.*,1998) (http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/tekrd/rd/apps/em/beps/scale_e.html).

1.2. Propriétés optiques des parties corticales

Les troncs, les branches et les rameaux ont des propriétés optiques différentes de celles des feuilles. Ces organes ne présentent pas les bandes d'absorption dans le visible, puisqu'ils sont dépourvus de chlorophylle. D'une façon générale, la réflectance dans le visible et le proche infrarouge croît lorsque la longueur d'onde augmente.

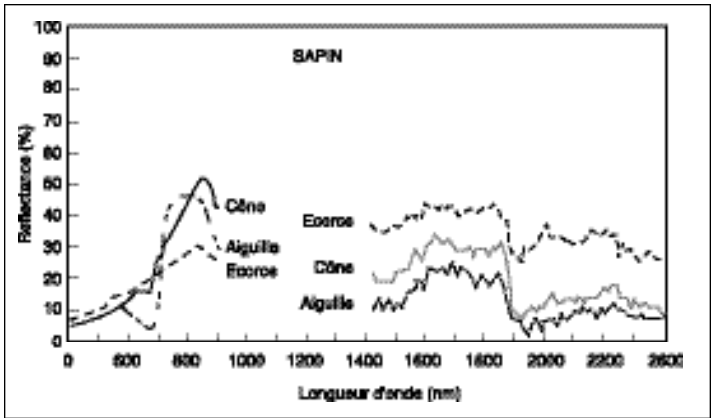


Fig. 4.12. Propriétés optiques des différents éléments d'un sapin (*Abies Alba*) (d'après Guyot et Riom, 1988 in Guyot *et al.*, 1989).

1.3. Propriétés optiques du sol

Les propriétés optiques du sol dépendent de sa composition minérale,de la teneur en eau et en matière organique et de la rugosité de surface. Les effets de la

rugosité sont très importants dans toutes les bandes spectrales allant du visible à l'infrarouge thermique. Plus les particules d'un sol donné sont fines, plus la réflectance est élevée. Une structure grossière du sol, suite à des travaux agricoles tels que les labours et les hersages, se traduit par des aspérités importantes qui accentuent la diffusion et génèrent des zones d'ombre. Concernant la teneur en eau, plus le sol est sec, plus sa réflectance est importante. La diminution de la teneur en eau du sol affecte de manière similaire toutes les bandes spectrales (fig. 4.13). Etant donné que la teneur en eau est, à la fois, très variable et déterminante dans le comportement optique des sols, certains auteurs (Baret, 1986) définissent un type de sol donné par une droite, dite droite du sol, mettant en relation sa réflectance dans le proche infrarouge et le rouge (fig. 4.14). Cette droite permet de caractériser les propriétés optiques du sol dans ces deux bandes, indépendamment de sa teneur en eau.

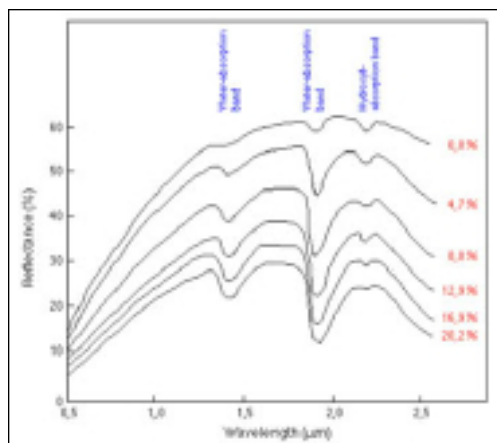


Fig. 4.13. Courbes de réflectance d'un sol en fonction de la teneur en eau (Centre canadien de télédétection)

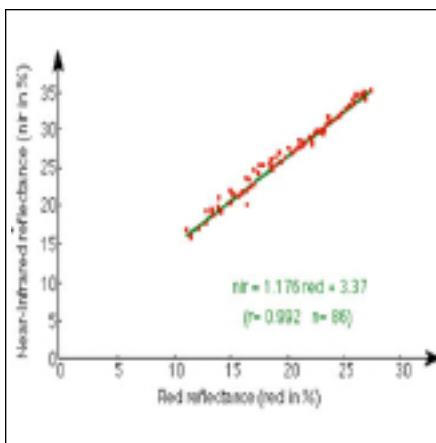


Fig. 4.14. Droite de régression entre le proche infrarouge et le rouge d'un sol nu (Centre canadien de télédétection).

2. Propriétés optiques du couvert végétal

Le comportement spectral d'un couvert végétal est la résultante de la contribution de la végétation et du sol sous-jacent qui, dans le cas des forêts, peut être couvert ou non par une végétation herbacée. La contribution du sol dans la radiométrie d'un pixel dépend essentiellement du taux du couvert et de l'épaisseur de la couche végétale qui le couvre. Ces deux caractéristiques structurales du couvert peuvent être exprimées, respectivement, par le degré d'ouverture du couvert et l'indice foliaire.

Le développement du couvert s'accompagne d'une augmentation de la réflectance dans le proche infrarouge et d'une diminution dans le rouge (fig. 4.15). Ces évolutions s'atténuent à mesure que la végétation devient couvrante et épaisse. La réflectance se stabilise à un niveau correspondant à un seuil de saturation qui dépend de la bande spectrale considérée. Ainsi, dans le proche infrarouge, les feuilles sont plus transparentes au rayonnement et le niveau de saturation est atteint pour une végétation plus dense que dans le rouge. Ensuite la phase de sénescence ramène les propriétés de la réflectance vers des valeurs qui caractérisent essentiellement le sol.

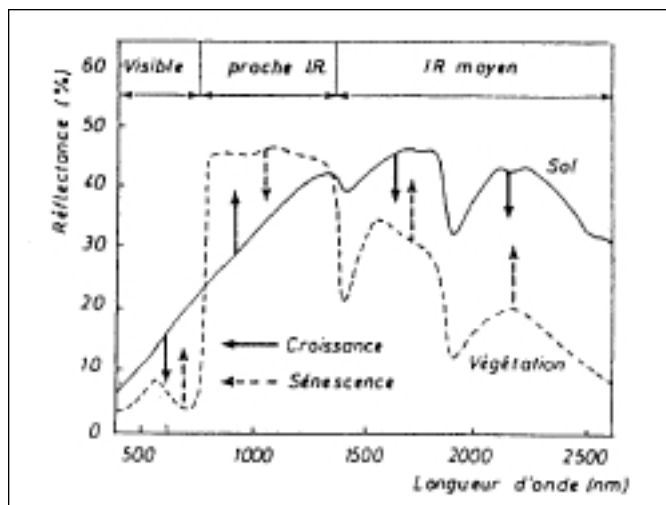


Fig. 4.15. Représentation schématique du sens de l'évolution de la réflectance d'un couvert végétal au cours de la phase active de croissance et de la sénescence (d'après Guyot, 1989).

Les études réalisées ne s'accordent pas sur une valeur d'indice foliaire pouvant provoquer cette saturation. En effet, d'autres facteurs, en particulier l'organisation spatiale

et les propriétés géométriques du couvert végétal, sont déterminants. Ces facteurs influencent la distribution des zones d'ombre et de lumière dans le couvert et la contribution du sol. Pour des couverts organisés en lignes, tels que les plantations de pin, la réflectance dépend de l'orientation des rangs par rapport aux rayons lumineux. Les proportions des zones d'ombre varient selon que les rayons lumineux sont parallèles ou perpendiculaires aux rangs. L'ampleur de l'effet des rangs sur le comportement optique du couvert dépend de la bande spectrale et du taux de couverture. Ces effets sont légèrement plus importants dans la bande visible que dans le proche infrarouge pour laquelle la végétation est plus transparente (Guyot, 1989 ; Guyot *et al.*, 1989). Un autre facteur important est la distribution des angles foliaires dont dépend fortement la contribution du sol. Pour un même indice foliaire, une distribution foliaire érectophile a pour effet d'augmenter la contribution du sol dans la réflectance du couvert. Dans le visible, le sol est généralement plus réfléchissant que la végétation, l'augmentation de sa contribution se traduit par une augmentation de la réflectance de l'ensemble du couvert. Dans le proche infrarouge, la tendance est inversée. Ces comportements, maintes fois vérifiés (Verhoef, 1984 ; Guyot, 1989 ; Guyot *et al.*, 1989 ; Baret *et* Guyot, 1991 ; Geol *et* Qin, 1994), mettent en évidence l'importance de la distribution des angles foliaires dans la réflectance du couvert.

L'importance de la géométrie du couvert dans sa réflectance se manifeste aussi dans les effets dus à la rugosité de la couronne supérieure des arbres, car celle-ci influence la distribution des zones d'ombre et de lumière. Notons enfin que d'autres facteurs, tels que les attaques parasitaires, un déficit hydrique ou le vent, peuvent affecter fortement la réflectance du couvert.

3. Relations entre l'information radiométrique et la structure des couverts forestiers

Sur une image de télédétection, les données radiométriques sont appelées "comptes numériques" (CN) car elles sont exprimées en niveaux de gris allant de 0 à 255 (image dite en 8 bits). Ces comptes numériques peuvent être transformés

en luminance L (en $W\ m^{-2}\ sr^{-1}\ mm^{-1}$) ou en réflectances (en pourcentage du rayonnement incident). Le passage des comptes numériques aux luminances et aux réflectances est une opération souvent compliquée car elle nécessite l'emploi d'équations de calibration propres au capteur et de modèles de corrections atmosphériques.

L'extraction de l'indice foliaire et autres caractéristiques structurales des couverts forestiers, à partir des données radiométriques, contenues dans les images de télédétection, est abordée selon deux approches :

- la première approche conduit à utiliser les relations empiriques qui associent l'indice foliaire avec les indices de végétation radiométriques. Dans ce cas, des mesures *in situ* sont directement mises en relation avec des acquisitions radiométriques (Peterson *et al.*, 1987 ; Running, 1988 ; Nemani et Running, 1989 ; Spanner *et al.*, 1990 ; Japriot *et al.*, 1990 ; Gamon *et al.*, 1995, Soudani, 1999) ;

- la seconde approche, beaucoup plus physique mais qui nécessite toutefois une validation terrain, consiste à prédire le comportement spectral des couverts forestiers à partir de modèles de transfert radiatif qui simulent l'interaction du rayonnement et les différentes composantes de la végétation et du sol (Verhoef *et al.*, 1984; Goel et Qin, 1994 ; Myneni *et al.*, 1990 ; Gastellu *et al.*, 1996 ; Baret et Guyot, 1991 ; Pinty *et al.*, 1993). L'inversion de ces modèles, lorsqu'ils sont inversibles, permet de fournir des estimations de l'indice foliaire et d'autres caractéristiques structurales et physico-chimiques du couvert (concentration chlorophyllienne, teneur en eau, etc.). Les modèles de transfert radiatif ont aussi permis d'évaluer les potentialités et les limites des indices de végétation radiométriques.

3.1. Indices de végétation radiométriques

Les données radiométriques sont souvent utilisées sous forme d'indices combinant les canaux rouge et proche infrarouge, respectivement XS_2 et XS_3 du satellite *SPOT*, TM_3 et TM_4 du satellite *Landsat Thematic Mapper*, canaux 1 et 2 du satellite *NOAA-AVHRR*. Ces indices sont mathématiquement exprimés de manière à utiliser le contraste important entre ces deux bandes. Ce contraste résulte de la forte absorption du rayonnement dans le rouge et de la forte réflectance dans le proche infrarouge (*fig. 4.9*).

La complexité structurale des couverts et la multitude des facteurs externes perturbateurs (géométrie de visée et élévation solaire, effets atmosphériques et propriétés optiques du sol) sont à l'origine de la multiplicité des indices. Ils sont classés en deux catégories (Baret et Guyot, 1991 ; Goel et Qin, 1994) :

- 1• Indices caractérisés par une pente : RVI (Ratio Vegetation Index, Pearson et Miller, 1972), NDVI (Normalized Difference Vegetation Index, Rouse *et al.*, 1974), SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index, Huete, 1988), TSAVI (Transformed Soil Adjusted Vegetation Index, Baret et al., 1989a), etc.

- 2• Indices caractérisés par une distance : WDV (Weighted Difference Vegetation Index, Clevers, 1986, 1989), PVI (Perpendicular Vegetation Index, Richardson et Wiegand, 1977).

Ces différents indices correspondent généralement à des relations géométriques dans le plan rouge / proche infrarouge (fig. 4.16). Bien que mathématiquement différents, certains indices véhiculent les mêmes informations spectrales et discriminent de manière équivalente les couverts végétaux.

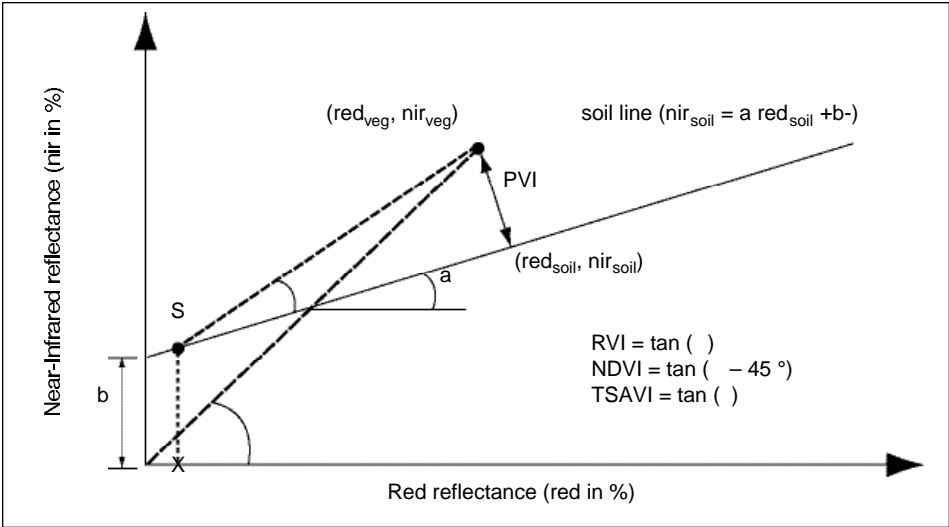


Fig. 4.16. Indices de végétation radiométriques (d'après Baret *et al.*, 1989a).

Si l'on désigne par ρ_{pir} et ρ_r les réflectances dans les deux bandes proche infra-rouge et rouge, les indices les plus fréquents sont :

DVI : Difference Vegetation Index

$$DVI = \rho_{pir} - \rho_r \tag{4.1}$$

RVI : Ratio Vegetation Index, appelé aussi Simple Ratio SR (Pearson et Miller, 1972)

$$RVI = \rho_{pir} / \rho_r \tag{4.2}$$

Il correspond à la pente d'une droite reliant l'origine (0,0) et un point (ρ_r, ρ_{pir}) correspondant à la végétation.

NDVI : Normalized Difference Vegetation Index, appelé aussi Normalized Difference ND (Rouse *et al.*, 1974)

$$NDVI = (\rho_{pir} - \rho_r) / (\rho_{pir} + \rho_r) \tag{4.3}$$

Le NDVI et le RVI peuvent s'exprimer explicitement l'un en fonction de l'autre :

$$NDVI = (RVI - 1) / (1 + RVI) = (\tan(a) - 1) / (\tan(a) + 1) = \tan(a - 45^\circ).$$

Ces deux indices contiennent les mêmes informations spectrales. Le DVI est très rarement utilisé, car il ne présente pas les avantages de NDVI et de RVI. Le rapport entre canaux permet de minimiser les effets de conditions d'éclairement et de la géométrie de visée, les effets atmosphériques et les erreurs de calibration (Baret et Guyot, 1991 ; Bonn et Rochon, 1992). Bien qu'il ne soit pas toujours approprié, le NDVI est de loin l'indice de végétation le plus utilisé.

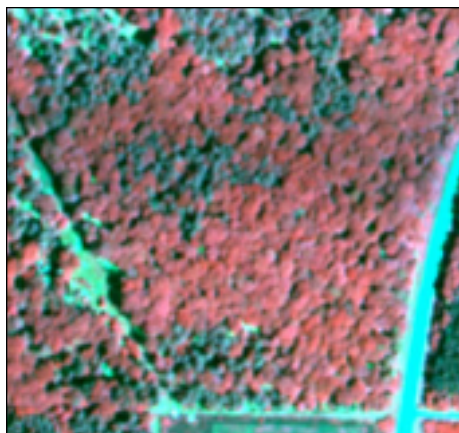


Fig.4.17. Composition colorée RVB.

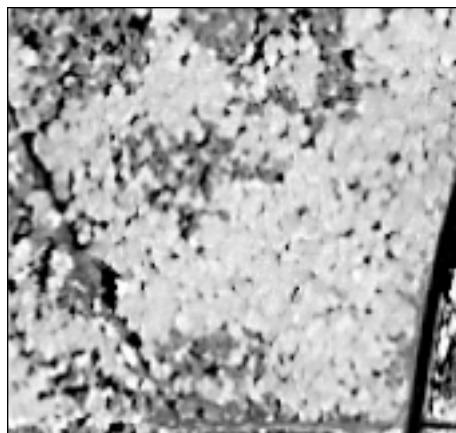


Fig.4.18. Image NDVI

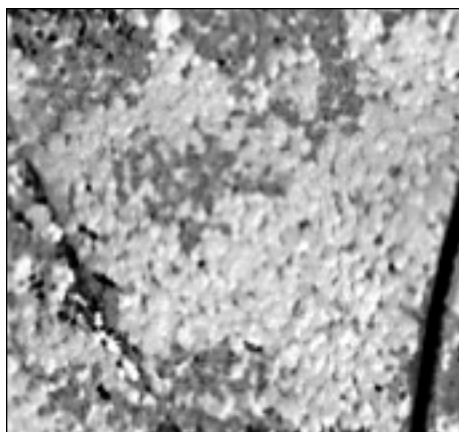


Fig.4.19. Image DVI.

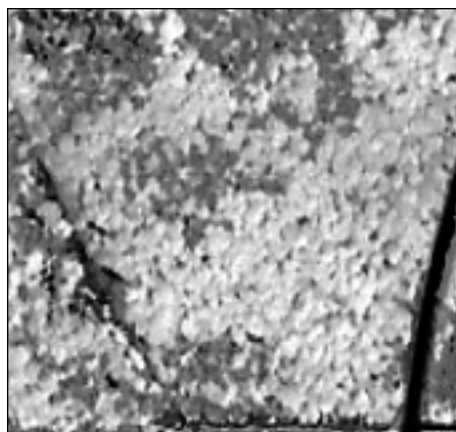


Fig. 4.20. Image RVI.

Sur l'image NDVI (*fig. 4.18*), les espèces feuillues apparaissent dans des teintes claires et correspondent à des fortes valeurs de l'indice. Les résineux apparaissent dans des teintes plus foncées. Les sols nus et les surfaces d'eau libre apparaissent dans des teintes très foncées et correspondent à des valeurs de l'indice faibles ou négatives.

WDVI : Weighted Distance Vegetation Index (Clevers, 1986,1989)

$$WDVI = \frac{p_{ir} - a_r}{a^2 + 1} \quad (4.4)$$

PVI : Perpendicular Vegetation Index (Richardson et Wiegand,1977)

$$PVI = \frac{1}{a^2 + 1} (p_{ir} - a_r - b) = \frac{1}{a^2 + 1} (WDVI - b) \quad (4.5)$$

Les deux paramètres a et b sont respectivement la pente et l'ordonnée à l'origine de la droite du sol (*fig. 4.16*).

Le PVI représente la distance perpendiculaire entre le point (r, p_{ir}) représentant la végétation et la droite du sol (*fig. 4.16*). Théoriquement le PVI est pratiquement nul pour un sol nu, négatif pour l'eau et positif pour la végétation.

Le PVI et le WDVl contiennent les mêmes informations spectrales.

GEMI : Global Environment Monitoring Index (Pinty et Verstraete, 1992)

$$\begin{aligned} \text{GEMI} &= [(1 - 0,25 \rho_r) - (\rho_r - 0,125)] / (1 - \rho_r) \\ &= [2(\frac{2}{\rho_{\text{pir}}} - \frac{2}{\rho_r}) + 1,5 \rho_{\text{pir}} + 0,5 \rho_r] / (\rho_{\text{pir}} + \rho_r + 0,5) \end{aligned} \quad (4.6)$$

Cet indice est théoriquement construit pour minimiser à la fois les effets du sol et atmosphériques.

SAVI : Soil Adjusted Vegetation Index (Huete, 1988)

$$\text{SAVI} = [(\rho_{\text{pir}} - \rho_r)(1+L)] / (\rho_{\text{pir}} + \rho_r + L) \quad (4.7)$$

L est un paramètre d'ajustement, introduit afin de minimiser les effets du sol. L varie de 0 à l'infini. Pour L = 0, le SAVI correspond au NDVI. Lorsque L tend vers +∞, le SAVI tend vers le DVI (Baret et Guyot, 1991). La valeur de L doit être théoriquement déterminée pour chaque type de sol. Pour des densités intermédiaires, le meilleur ajustement est obtenu pour une valeur de L = 0,5. Cette valeur semble satisfaisante pour aborder la plupart des situations (Baret et Guyot, 1991).

TSAVI : Transformed Soil Adjusted Vegetation Index (Baret *et al.*, 1989a)

$$\text{TSAVI} = a(\rho_{\text{pir}} - a\rho_r - b) / [a\rho_{\text{pir}} + \rho_r - ab + (1+a^2)] \quad (4.8)$$

Le TSAVI correspond à la tangente de l'angle (fig. 4.16). Il s'agit d'une amélioration du PVI. La valeur de a est déterminée pour minimiser les effets du sol. Elle est généralement prise égale à 0,08. Le TSAVI est égal à 0 pour un sol nu et proche de 0,7 pour des couverts très denses. Pour a = 1 et b = 0, le TSAVI est très proche du NDVI et du SAVI pour L = 0.

Deux autres indices ont été introduits par Qi *et al.* (1994) :

SAVI_L où le paramètre L de l'équation 4.7 est pris égal à :

$$L = 1 - 2,12 \text{ NDVI WDVl} \quad (4.9)$$

$$\text{SAVI}_2 = \rho_{\text{pir}} + 0,5 - [(\rho_{\text{pir}} - 0,5)^2 - 2(\rho_{\text{pir}} - \rho_r)]^{1/2} \quad (4.10)$$

De nombreuses relations entre l'indice foliaire LAI et les indices de végétation radiométriques ont été établies : Peterson *et al.* (1987) entre le LAI et le RVI (Ratio Vegetation Index) sur des forêts de conifères, à partir des données du satellite *LANDSAT Thematic Mapper* (SR = 1,92 LAI^{0,583}, R² = 0,91) ; Jappiot *et al.* (1990) entre le LAI et le NDVI sur des châtaigniers à partir des données *SPOT* (NDVI = 0,165 LAI^{0,1058}, R² = 0,98) ; Nemani et Running (1989) entre le LAI et le NDVI (NDVI = 0,35 L_N(LAI/1,652), R² = 0,80) sur des forêts de conifères, à partir des données du satellite *LANDSAT Thematic Mapper* ; Soudani (1999) sur des forêts de chênes, à partir des données *SPOT* (NDVI = 0,1326 L_N(LAI) + 0,3624, R² = 0,86).

Les relations empiriques entre les indices de végétation radiométriques VI et l'indice foliaire LAI sont généralement de type exponentiel. Elles s'écrivent sous la forme suivante (Baret et Guyot, 1991) (fig. 4.21) :

$$\text{VI} = \text{VI}_s + (\text{VI}_s - \text{VI}_0) \exp(-K_{\text{VI}} \text{LAI}) \quad (4.13)$$

VI étant un indice de végétation radiométrique tels que le NDVI, le SAVI etc. Il s’agit d’un modèle de type “loi d’extinction” de Beer-Lambert où VI_s est l’indice de végétation radiométrique pour un sol nu ; VI_∞ est une valeur asymptotique traduisant une saturation de l’indice de végétation radiométrique lorsque l’indice foliaire est très grand ; K_{VI} est un coefficient positif contrôlant la différentielle de la relation $VI(LAI)$. Le tableau 4.2 donne quelques estimations de ces différents coefficients pour des peuplements feuillus tempérés.

Tab. 4.2. Coefficients des modèles $VI=f(LAI)$ pour des peuplements de feuillus (d’après Grégoire-Himmler, 1995).

	NDVI	SAVI	TSAVI
K_{VI}	0,5	0,49	0,45
VI_∞	0,71	0,6	0,6
VI_s	0,14	0,13	0,01

Les paramètres VI_∞ , K_{VI} dépendent des conditions d’éclairement, de la géométrie de visée et de l’inclinaison foliaire. Pour un angle de visée et un angle solaire fixes, K_{VI} diminue lorsque l’inclinaison des feuilles augmente (Baret et Guyot, 1991). VI_∞ est peu affecté par l’inclinaison foliaire et les légères variations observées dépendent de l’indice de végétation radiométrique considéré. Baret et Guyot (1991) notent que le TSAVI est insensible, PVI et SAVI diminuent et NDVI augmente, lorsque l’inclinaison des feuilles augmente.

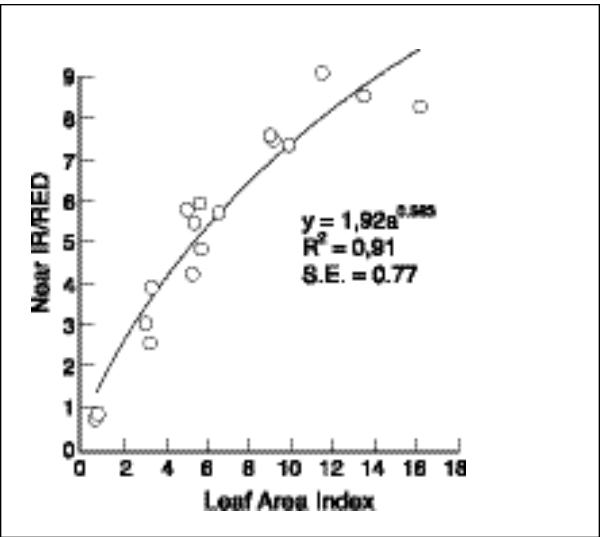


Fig. 4.21. Relation LAI-RVI (PIR/R) sur une forêt de conifères (Peterson *et al.*, 1987).

Le plateau atteint par la relation d’ajustement pour les fortes valeurs de LAI est variable. Il est atteint pour une valeur LAI de 8 pour le TSAVI sur une culture de blé (Baret *et al.*, 1989b), d’environ 7 pour le NDVI sur une culture de blé (Asrar *et al.*, 1984), d’environ 16 pour le RVI sur un couvert forestier de conifères (Peterson *et al.*, 1990), d’environ 11 pour le NDVI sur des forêts matures de conifères (Nemani et Running, 1989).

Les performances des divers indices radiométriques pour l'estimation de l'indice foliaire ont été évaluées selon les caractéristiques structurales propres au couvert végétal (effets du sol sous-jacent, de la distribution des angles d'inclinaison foliaire, de l'hétérogénéité spatiale du couvert), mais aussi selon leur sensibilité aux facteurs externes, tels que les conditions d'éclairement, la géométrie de visée et les effets atmosphériques (Baret et Guyot, 1991). Les effets du sol sont de loin les plus indésirables et de nombreux indices sont essentiellement conçus pour tenter de les minimiser. Baret et Guyot, (1991) notent que la sensibilité de ces indices est variable selon la valeur de l'indice foliaire considérée et l'inclinaison foliaire. Pour les couverts très peu denses ($LAI < 0,5$), le NDVI est affecté par les propriétés optiques du sol, quelle que soit l'inclinaison foliaire. Pour un $LAI < 4$, les meilleurs indices sont respectivement le TSAVI, SAVI et PVI. Pour un $LAI > 4$, les performances des divers indices dépendent fortement de l'inclinaison foliaire. Pour les couverts à feuilles plutôt horizontales, le classement des indices en fonction de leur performance est le suivant : $PVI < SAVI < NDVI < TSAVI$. Au contraire, pour les couverts à feuilles érigées, le classement est : $NDVI < TSAVI < SAVI < PVI$. Rappelons que ces conclusions sont des résultats de simulation. Seules les propriétés optiques des feuilles et du sol ont été considérées. Ces propriétés sont constantes et le modèle de réflectance utilisé, SAIL (Sattering by Arbitrarilly Inclined Leaves de Verhoef, 1984), est conçu pour des couverts homogènes.

Les effets des autres facteurs, en particulier les effets atmosphériques, sur les performances des indices de végétation radiométriques ont été abordés par de nombreux auteurs (Myneni et Asrar, 1994 ; Pinty *et al.*, 1993). Les indices de végétation radiométriques, déterminés directement à partir des données satellitaires brutes, diffèrent de ceux pouvant être obtenus au sommet du couvert après corrections atmosphériques. Rappelons que la normalisation (NDVI, SAVI, TSAVI) permet de minimiser ces effets et la possibilité de les utiliser sans corrections (Baret et Guyot, 1991; Bonn et Rochon, 1992). Pinty et Verstraete (1992) proposent d'utiliser le GEMI (Global Environment Monitoring Vegetation Index) comme indice permettant de mieux minimiser les effets atmosphériques.

3.2. Modèles de transfert radiatif

De nombreux travaux ont cherché à construire des modèles permettant de décrire les flux de rayonnement à l'échelle du couvert en fonction des caractéristiques structurales et optiques de ce dernier.

Dans ces modèles, la réflectance du couvert est considérée comme une résultante des effets combinés des conditions d'illumination et de visée, de la structure du couvert, des propriétés optiques des surfaces photosynthétiques et non photosynthétiques (troncs, branches, etc.), des propriétés optiques des surfaces sous couvert (sol, litière, tapis végétal). Les conditions d'illumination et d'acquisition sont exprimées par l'angle d'inclinaison et d'orientation solaire et d'observation. Les propriétés optiques des surfaces réfléchissantes sont exprimées par les courbes de réflectance et de transmittance hémisphériques. Les attributs de structure, qui constituent les principaux facteurs contrôlant la réflectance du couvert (Asner, 1998, Chen *et al.*, 1999), sont l'indice de surface des parties photosynthétiques (LAI) et non photosynthétiques (WAI), les distribution des angles d'inclinaison et d'orientation des feuilles et des parties non photosynthétiques.

Les modèles de transfert radiatif ont principalement servi à étudier les effets de certains facteurs, tels que les propriétés optiques du couvert et du sol, les conditions atmosphériques, la géométrie de visée ou pour tester les performances de divers indices de végétation radiométriques (Verstraete *et al.*, 1990 ; Goel et Qin, 1994 ; Myneni et Williams, 1994 ; Myneni *et al.*, 1994, Myneni *et al.*, 1995, Asner *et al.*, 1998, 1999, Leblanc *et al.*, 1997; Guyot et Baret, 1991). Ces modèles ont pour principaux inconvénients d'être basés sur des hypothèses simplificatrices où le couvert est considéré comme un milieu homogène et continue (Verhoef *et al.*, 1984, Goel et Qin, 1994). Ceux qui sont plus réalistes sont difficiles à paramétrer et utilisent des entrées difficiles d'accès (Myneni *et al.*, 1990 ; Gastellu *et al.*, 1996).

Les potentialités offertes par les modèles de transfert radiatif pour l'étude des couverts forestiers sont énormes mais il reste encore à les définir et à les exploiter pour répondre à des objectifs immédiats et réels. On cite le modèle SAIL (Scattering by Arbitrarily Inclined Leaves) (Verhoef, 1984 ; Baret et Guyot, 1991), DART (Discrete Anisotropic Radiative Transfer) (CESBIO, Centre d'études spatiales de la biosphère, CNES, France), le modèle FLIM (Forest Light Interaction Model) (Rosema *et al.* 1992), le modèle 5-scales combinant le modèle 4-Scales développé par Chen et Leblanc (1997) et le modèle de réflectance LIBERTY développé par Dawson *et al.* (1998).

Afin d'illustrer la manière dont le couvert forestier est pris en compte dans certains de ces modèles, la figure 4.22 résume les paramètres d'entrée, caractéristiques du couvert, dans le modèle 5-scales :

All Parameters

Domain (Pixel)
 Size: 10000
 Number of stem: 400

Crown Architecture
 Ha (stick height): 15
 Hb (crown height m): 5
 Crown Radius (m): 3
 Species: ☒ Conifer ☐ Deciduous

Tree Clumping
 Number of quadrats: 30
 Neyman grouping: 5

Solar zenith Angle (deg): 40
 Leaf Area Index: 3.5

Plot Parameters
 VZA MAX: 85
 ANGLE STEP: 5

☒ Branch Architecture

No Branches
 $G(\theta) = A \times C + C$: 0 X + 0.5
 Clumping Index: 0.8

With Branches
 Branch Inclination: 15
 Leaves orientation: 75
 Branch Thickness: 0.1
 Ratio leaf thickness/width: 0.2
 Branch Index: 0.9

Conifer
 Apex Angle (deg): 13
 Needle-to-Shoot ratio: 1.41

Foliage size: 0.05
 Repulsion Factor: 0.5

Numerical Integral Foliage Increment in Multiple Scattering Scheme: 0.2

☒ Rayleigh Scattering (Atm.)
☐ % Direct Visible Light

Wavelength (nm): Band 1: 670, Band 2: 865, Band 3: 1600, Band 4: 1600

Reflectivities
 Foliage: Band 1: 0.1, Band 2: 0.5, Band 3: 0.1, Band 4: 0.1
 Background: Band 1: 0.05, Band 2: 0.12, Band 3: 0.2, Band 4: 0.2
 Transmittance: Band 1: 0.06, Band 2: 0.3, Band 3: 0.15, Band 4: 0.15

☒ Keep Previous Plane Simulation
☐ Plane ☐ Hyperspectral
☒ Hemispherical ☐ User Defined

Shaded Reflectivities
 Foliage: Band 1: 0.005, Band 2: 0.1, Band 3: 0.02, Band 4: 0.02
 Background: Band 1: 0.005, Band 2: 0.04, Band 3: 0.06, Band 4: 0.06
☒ Multiple Scattering Scheme

Reduced SR
 SWIR Min: 0.05
 SWIR Max: 0.3

Band 1: 0.95, Band 2: 0.98, Band 3: 0.99, Band 4: 0.999

OK Cancel << Less

Fig. 4.22 Entrées du modèle 5-Scales de Chen et Leblanc (1997) résumant les caractéristiques structurales et optiques d'un jeune peuplement de pin et du sol sous-jacent (LAI = 3,5, densité de 400 arbres/ha).

Notons seulement que, dans ce modèle, les couronnes des arbres sont représentées par des formes géométriques simples (cônes pour les conifères et des ellipsoïdes pour les feuillus). Le lecteur trouvera dans le manuel "5-Scales", une description détaillée de ce modèle. Ce manuel peut être téléchargé ou demandé auprès du Canada Centre for Remote Sensing, Environmental Monitoring Section (<ftp://ftp.ccrs.nrcan.gc.ca/ad/EMS/4-SCALE/PC/5-scale.zip>).

L'inversion des modèles de transfert radiatif consiste à utiliser les réflectances pour estimer des grandeurs structurales telles que l'indice foliaire, les angles foliaires, les fractions de trouées et le taux du couvert, etc. Lorsque le modèle radiatif considéré est couplé à un modèle feuille tel que LIBERTY, l'inversion permet aussi d'estimer les caractéristiques de structure, la teneur en eau et en chlorophylle foliaires. Alors qu'un modèle de transfert radiatif utilise de nombreuses variables d'entrée pour estimer seulement une variable de sortie qui est la réflectance, son inversion part au contraire d'une seule variable d'entrée (la réflectance, généralement à différentes géométries de visée) pour décrire plusieurs variables de sortie. On imagine bien la complexité d'une telle démarche. De plus tous les modèles de transfert radiatif ne sont pas inversibles. L'inversion de certains de ces modèles pour l'estimation de l'indice foliaire fait l'objet de nombreux travaux de recherche. Le modèle DART a été appliqué à une image *SPOT* pour cartographier l'indice foliaire sur la forêt de Fontainebleau. L'inversion de ce modèle a permis d'obtenir des résultats satisfaisants. Le modèle FLIM a fait l'objet de plusieurs tests dans le cadre du projet MARIE-F (Monitoring and Assessment of Resources in Europe-Forest, 1999). Ce modèle part d'une approche simple où la radiométrie du couvert est considérée comme étant la résultante de la contribution du sol et de la végétation en distinguant entre les taches de lumière et les taches d'ombre. L'extinction du rayonnement est abordée à partir d'un modèle de type exponentiel, en distinguant entre l'extinction inter-couronnes, qui dépend de la densité, et intra-couronnes, fonction de l'indice foliaire. L'inversion de ce modèle aboutit à des estimations du taux du couvert (crown cover) et de la transmittance des couronnes (crown transmittance). Les potentialités et les limites de ce modèle ont été évaluées dans divers couverts forestiers (France, Pays Bas, Finlande, Irlande et Italie) (MARIE-F, 1999).

4. Apports de la télédétection en hyperfréquences RADAR pour l'étude de la structure des couverts forestiers

L'imagerie radar consiste à émettre des impulsions d'énergie en hyperfréquences vers les divers éléments du paysage et à enregistrer les échos. Une information, équivalente à la réflectance dans les images optiques, est extraite des images radar. Elle correspond à une diffusion moyenne (differential scattering cross-section per unit area) ou coefficient de retrodiffusion noté σ^0 . Cette quantité est théoriquement adimensionnelle mais on l'exprime en décibels. Le signal est émis par une antenne fixée sur le côté de la plate-forme. L'antenne illumine une bande perpendiculaire à l'axe du vol. De ce fait, on appelle un tel système un radar latéral, plus connu sous le nom de SLAR (Side Looking Airborn Radar). On en distingue

deux types : (1) le radar à ouverture réelle (Real Aperture Radar) ; (2) le radar à ouverture synthétique ou encore radar à synthèse d'ouverture SAR (Synthetic Aperture Radar). Une description de ces deux systèmes est donnée par Bonn et Rochon (1992). Notons seulement que le SAR a pour principal avantage de permettre une meilleure résolution spatiale azimutale.

Le tableau 4.3 résume les longueurs d'ondes utilisées en télédétection radar :

Tab. 4.3. Longueurs d'ondes utilisées en télédétection radar (Bonn et Rochon,1992).

Bande	Fréquence (GHz)	Longueur d'onde (cm)
P	0,3-1	30-100
L	1-2	15-30
S	2-4	7,5-15
C	4-8	3,75-7,5
X	8-12,5	2,4-3,75
Ku (J)	12,5-18	1,67-2,4
K	18-27	1,1-1,67
Ka (Q)	27-40	0,75-1,1

La télédétection active en hyperfréquences consiste à établir des relations entre le coefficient de retrodiffusion et les grandeurs biophysiques. Pour un couvert forestier, la rétrodiffusion résulte des actions combinées du volume végétal, du sol sous-jacent et des réflexions multiples sol/végétation.

La végétation agit par sa structure (forme, dimensions, distribution, orientation et inclinaison des feuilles, branches et troncs) et sa biomasse (Soudani, 1994 ; Dupont, 1990 ; Ulaby *et al.*, 1982). Le signal radar est aussi fortement lié à la teneur en eau du sol (Benallegue *et al.*, 1994, Engman, 1991). L'image résultante est caractérisée par de très grandes variations des niveaux de gris entre les zones à forte rétrodiffusion (forêts) et les zones à rétrodiffusion faible (surfaces d'eau libres). C'est pourquoi elles sont souvent enregistrées en format 16 bits (65 536 niveaux de gris) alors que la plupart des images dans le domaine optique du spectre sont en format 8 bits (256 niveaux de gris). Une autre caractéristique de l'image radar est son aspect poivre et sel dû à l'effet de speckle (chatoiement). Ce phénomène est un bruit dû à la nature cohérente de l'onde radar.

Une image RADAR, telle que l'image ERS-1 de la figure 4.3, montre que les surfaces d'eau libre ressortent dans des teintes sombres correspondant à une faible rétrodiffusion. Les surfaces d'eau se comportent comme des surfaces lisses ayant pour effet de provoquer une réflexion spéculaire (comportement comparable à un miroir) dans une direction opposée à la direction d'incidence. Signalons que la réponse des surfaces d'eau libre est fortement instable car elle est liée aux conditions du vent. Les couverts forestiers présentent au contraire une forte rétrodiffusion et apparaissent dans des teintes claires. Ceci est lié à la complexité structurale du milieu (troncs, branches et feuilles) engendrant des phénomènes de réflexion multiple. Les troncs et les branches constituent des surfaces très

réfléchissantes. A un degré moindre, l'hétérogénéité et les différents âges du peuplement traduisent une irrégularité du couvert et donc un effet de rugosité. Signalons aussi que certaines surfaces telles que les espaces urbains ressortent dans des teintes claires. Ces surfaces sont fortement hétérogènes. Les bâtiments, voiries et parkings sont des forts réflecteurs radar.

Très peu de travaux ont porté sur l'estimation de l'indice foliaire à partir des hyperfréquences radar. La plupart de travaux ont concerné les cultures. Une synthèse bibliographique a été réalisée par Champion *et al.* (1996). Prévot *et al.* (1996) donnent une expression de la rétrodiffusion radar en fonction de l'indice foliaire et la teneur en eau de la végétation et du sol.

Conclusion

L'emploi des images de télédétection pour l'estimation de l'indice foliaire demeure encore une affaire de spécialistes. Les étapes préalables avant l'exploitation de l'information radiométrique sont relativement longues et fastidieuses. En effet, les images acquises par les systèmes spatiaux ou aéroportés ne sont pratiquement jamais superposables à une carte et il est nécessaire de corriger géométriquement les données. Les effets atmosphériques doivent aussi être pris en compte et corrigés. Cette étape est fondamentale pour des études multi-temporelles du couvert.

Alors que sur les cultures, les relations LAI et indices de végétation radiométriques sont relativement simples à établir (Asrar *et al.*, 1984), les forêts présentent des difficultés particulières en raison de leurs dimensions et de leur hétérogénéité structurale. La présence de sous-étages et de tapis herbacés peut contribuer d'une façon non négligeable à la réflectance du couvert (Peterson *et al.*, 1987 ; Spanner *et al.*, 1990 ; Graetz, 1990 ; Soudani, 1999). De plus, l'existence de surfaces non photosynthétiques (sol, affleurement rocheux et surfaces corticales) affecte les réponses radiométriques. Le choix d'un indice de végétation radiométrique particulier n'est pas toujours une opération aisée lorsqu'on ne dispose pas de toutes les informations structurales, essentiellement la distribution des angles d'inclinaison foliaire, qui influencent fortement les performances de divers indices. Cette complexité de la nature de liens entre la structure des couverts forestiers et les données radiométriques correspondantes doit toujours être prise en compte, car elle conditionne la validité des relations pouvant être établies et leur éventuelle transposition sur d'autres sites.

Chapitre 5

Problèmes posés par les méthodes indirectes optiques et tendance de développement

Introduction

De nombreux travaux effectués, dans différents types de forêts, indiquent que les méthodes indirectes sous-estiment l'indice foliaire. Dans un peuplement de sapin Douglas (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.)), Smith *et al.* (1993) ont trouvé que le LAI-2000 PCA sous-estimait l'indice foliaire d'environ 62 % c'est-à-dire que le LAI mesuré par cet instrument ne correspondait qu'à 38 % de l'indice foliaire mesuré par une méthode directe. Gower et Norman (1991) aboutissent à des conclusions similaires dans des peuplements de pin rouge (*Pinus resinosa*), de pin blanc (*Pinus strobus*), de mélèze d'Europe (*Larix decidua*) et d'épicéa (*Picea abies*). Cette sous-estimation est située entre 35 et 40 % pour ces quatre espèces résineuses. Dans un peuplement de chêne, châtaignier et hêtre, Cutini *et al.* (1998) observent une sous-estimation de l'indice foliaire, par le PCA LAI-2000, de 26,5% en moyenne par rapport à l'indice foliaire mesuré par la collecte de litière. D'autres travaux ont abouti à des conclusions similaires (fig. 5.1). Gower *et al.* (1999) signalent que la sous-estimation de l'indice foliaire par les méthodes indirectes est d'environ 25 à 30 % dans la plupart des canopées forestières.

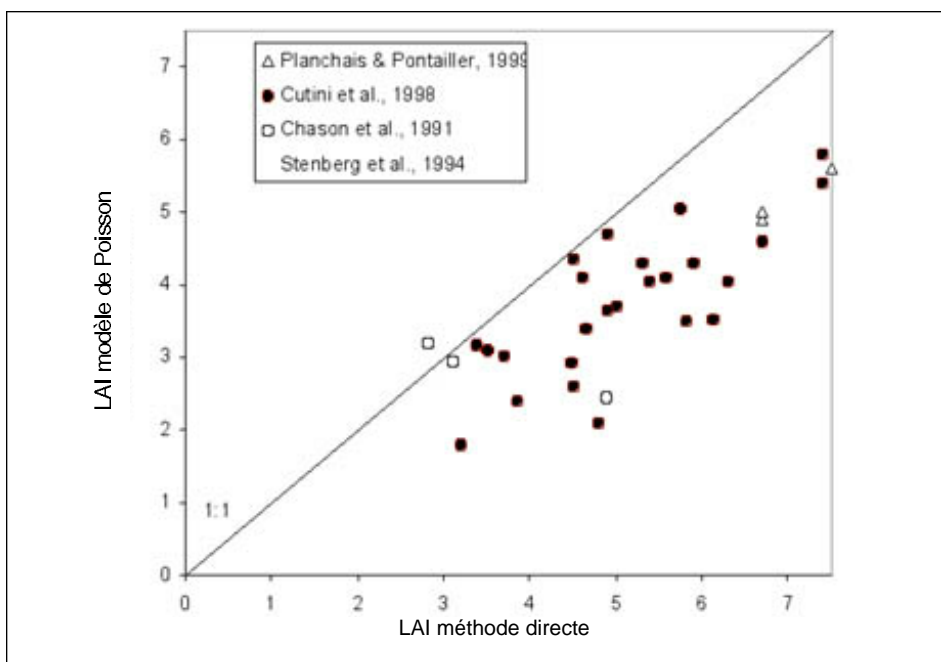


Fig.5.1. Relations entre LAI indirect et LAI direct.

Ces travaux attribuent cette sous-estimation à l'inadéquation du modèle poissonnien aux couverts forestiers. Rappelons que ce modèle est basé sur une distribution aléatoire des éléments foliaires dans le volume végétal. Alors qu'il semble aisé de satisfaire cette hypothèse dans les cultures et les prairies, à couverts relativement homogènes et uniformes, les couverts forestiers présentent des structures discontinues et hétérogènes. En effet, la distribution des éléments foliaires y est agrégative et le modèle poissonnien, du moins sous sa forme classique, semble inadapté à des tels milieux (Nilson, 1971 ; Lang, 1986, 1987 ; Kucharik *et al.*, 1997 ; Chen *et al.*, 1997). Afin de tenir compte des effets de l'agrégation foliaire, une première modification du modèle de Poisson a été proposée par Nilson (1971), qui introduit un paramètre de correction Ω dans l'expression de la fraction de trouées :

$$P(\theta) = e^{-G(\theta) \text{ LAI} / \cos \theta} \quad (5.1)$$

Rappelons que $P(\theta)$ est la fraction de trouées dans la direction θ , LAI est l'indice foliaire, $G(\theta)$ est la projection d'une unité de surface foliaire dans une direction perpendiculaire à θ , $\cos \theta$ est le complémentaire de la hauteur angulaire h (voir chap. 2) et Ω est un facteur mesurant l'agrégation foliaire.

D'autres travaux (Fournier *et al.*, 1997 ; Walter et Torquebiau, 1997 ; Chen *et al.*, 1997) signalent que l'agrégation de la végétation se manifeste à différentes échelles. En effet, l'agrégation peut être observée dans des bouquets d'arbres d'un même peuplement, entre couronnes à l'intérieur d'un même bouquet, entre les branches à l'intérieur de la couronne, entre rameaux à l'intérieur de la même branche et entre feuilles sur le même rameau. Ceci est particulièrement le cas des conifères, où la disposition des aiguilles autour des rameaux (pousses) est fortement agrégative (Chen *et al.*, 1991). Chen *et al.* (1997) distinguent deux niveaux d'agrégation : une agrégation à une échelle supérieure à la taille de trouées à l'intérieur de la pousse et une qui lui est inférieure. Ces mêmes auteurs proposent de modifier l'expression donnée par Nilson (équation 5.1) pour tenir compte de ces deux échelles :

$$P(\theta) = e^{-G(\theta) (\Omega_e / \gamma_e) \text{ LAI} / \cos \theta} \quad (5.2)$$

Le facteur d'agrégation est structuré par deux paramètres : Ω_e qui représente l'agrégation entre les pousses feuillées et γ_e qui représente l'agrégation des feuilles (ou des aiguilles) à l'intérieur de la même pousse. Dans la terminologie anglosaxonne, γ_e est connu sous le terme *within shoot clumping factor* pour les conifères et *within leaf clumping of foliage* pour les feuillus.

Une autre hypothèse, implicite dans les méthodes indirectes optiques, conduit à considérer le volume végétal comme un milieu constitué seulement de feuilles et de trouées. L'indice foliaire estimé par ces méthodes est en réalité un indice végétal (VAI). Pour tenir compte de la contribution des branches et troncs, Chen (1996) modifie l'équation 5.2 comme suit :

$$P(\theta) = e^{-G(\theta) (\Omega_e / \gamma_e) \text{ VAI} / \cos \theta} \quad (5.3)$$

En tenant compte à la fois de l'agrégation foliaire et de la contribution des parties corticales, Chen (1996) note que les méthodes indirectes optiques estiment la quantité $(\Omega_e / \gamma_e) \text{ VAI}$. Cette quantité est appelée *effective leaf area index* L_e . L'indice

foliaire proprement dit LAI est la différence entre l'indice végétal VAI et l'indice de bois WAI : $LAI = VAI - WAI = VAI (1 - \Omega_e)$ ou est le rapport entre WAI et VAI ou encore $LAI = (1 - \Omega_e) L_{e_e} / \Omega_e$.

L'expression finale du modèle poissonnien modifié est donc la suivante :

$$P(\lambda) = e^{-G(\lambda)} \frac{e^{G(\lambda)}}{G(\lambda)^{\lambda}} LAI / \cos(\theta) \quad (5.4)$$

C'est la quantité LAI qui est, théoriquement, déterminée par les méthodes directes de référence (collecte de litière et méthodes allométriques). Les méthodes indirectes telles que le PCA LAI-2000, le Sunscan et la technique des photographies hémisphériques déterminent la quantité L_{e_e} . L'estimation de l'indice foliaire proprement dit nécessite une estimation des deux facteurs d'agrégation et la détermination de la contribution des branches et troncs.

1. Mesure de l'agrégation foliaire dans les couverts forestiers

1.1. Mesure du facteur d'agrégation foliaire Ω_e

On dispose de deux instruments permettant d'estimer le facteur Ω_e . Ces deux instruments sont le TRAC (Tracing Radiation and Architecture of Canopies) mis au point par Chen *et al.* (1997) et le MVI (Multiband Vegetation Imager) mis au point par Kucharik *et al.* (1997). Du fait que la taille de trouées à l'intérieur des branches est inférieure à la résolution spatiale de ces deux instruments, seul Ω_e est estimé. L'estimation de Ω_e nécessite des mesures indépendantes au laboratoire.

Une description du TRAC est accessible sur le site du Centre canadien de télédétection (CCRS) :

http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/tekrd/rd/apps/em/beps/trac_e.html

Le TRAC est un instrument portable pouvant être manipulé par une personne. Les acquisitions s'effectuent par ciel clair. L'opérateur marche sous couvert, le long d'un transect d'une longueur d'environ 200 à 300 m, à une vitesse régulière (environ 0,3 m/s), et enregistre à très haute fréquence le rayonnement transmis dans le PAR (400-700 nm). Ces mesures sont effectuées par temps ensoleillé et peuvent être pratiquées à différentes hauteurs du soleil. Les figures 5.2 et 5.3 montrent un exemple de mesures à l'aide du TRAC dans un peuplement de pin gris.

Les pics (fig. 5.2) correspondent à des taches de lumière plus ou moins importantes. Les pics, observés sur des distances suffisamment importantes, sont généralement associés à de larges trouées situées entre les cimes des arbres. Les pics observés sur des distances plus courtes correspondraient généralement à des petites trouées à l'intérieur de la même cime ; les faibles valeurs de rayonnement sont associées à des zones de végétation denses. À partir de ces mesures, Chen et Cihlar (1995) établissent la distribution de la fraction de trouées totale en fonction de la taille dans la direction du parcours d'échantillonnage (fig. 5.3). L'ordonnée d'environ 0,3 est la fraction de trouées moyenne (trouées de taille > 0), déterminée par le

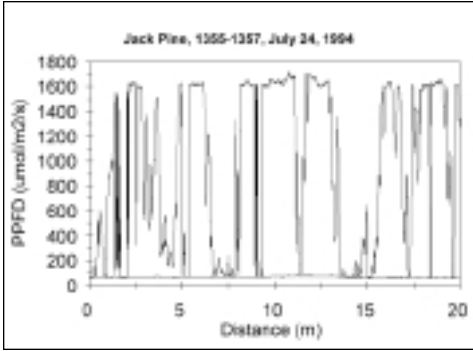


Fig. 5.2. Variation du rayonnement transmis le long d'un cheminement de 20 m (source CCRS).

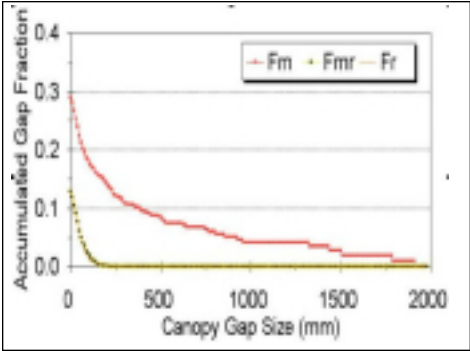


Fig. 5.3. Distribution de la fraction de trouées en fonction de leurs tailles le long du même cheminement

rapport entre la longueur totale des trouées et la longueur du transect. Elle correspond à celle mesurée habituellement par le rapport du rayonnement transmis au rayonnement incident (Demon, PCA LAI-2000). F_m , F_r et F_{mr} de la figure 5.3 sont, respectivement, la distribution observée, la distribution théorique prédite dans le cas aléatoire (Miller et Norman, 1971) et la distribution observée corrigée selon une méthode proposée par Chen et Cihlar (1995). La correction s'effectue par extraction des fractions de trouées excédentaires entre la distribution observée et la distribution théorique aléatoire (Chen, 1996).

Le facteur d'agrégation est calculé comme suit :

$$e = \frac{(1 + g)L_N[F_m]}{L_N[F_{mr}]}$$

Δg est la fraction de trouées totale extraite. Elle est donnée par :

$$g = F_m - F_{mr}$$

Chen (1996) signale que le facteur d'agrégation varie en fonction de l'angle zénithal. En supposant une variation linéaire de Ω_e en fonction de θ , il propose de considérer la valeur moyenne et de prendre Ω_e mesuré pour $\theta = 39^\circ$.

Les estimations fournies par le TRAC ont été validées par plusieurs travaux (Chen et Cihlar, 1995 ; Chen, 1996 ; Chen *et al.*, 1997 ; Kucharik *et al.*, 1997). Bien que cet instrument puisse fournir une estimation de l'indice foliaire, Chen *et al.* (1997) recommandent de ne l'utiliser que pour déterminer le facteur d'agrégation Ω_e . Ce facteur est ensuite utilisé pour corriger les estimations fournies par les méthodes indirectes, en particulier celles fournies par le PCA LAI-2000.

Le second instrument permettant d'estimer le facteur d'agrégation Ω_e est le MVI (Kucharik *et al.*, 1997, Kucharik, 1998). Une description détaillée de cet instrument est accessible sur le site :

http://daacl.esd.ornl.gov/boreas/TE/te6mltvcomp/TEo6_Multi_Veg_Imager.txt.

Cet instrument est constitué d'une caméra CCD, muni d'un objectif de 24 mm ou de 35 mm de focale et d'un jeu de filtres permettant l'acquisition de deux images complémentaires : l'une dans le visible de 400 à 620 nm et l'autre dans le proche infrarouge de 720 à 950 nm. Les acquisitions s'effectuent sous le couvert avec

l'objectif dirigé vers le ciel et l'appareil monté sur un trépied. Les photos 5.1 et 5.2 correspondent à des acquisitions sous un couvert de peuplier tremble (*Populus tremuloides*).



Photo. 5.1. Photographie dans le visible, acquise par le MVI sous un couvert forestier de tremble (Kucharik *et al.*, 1998).

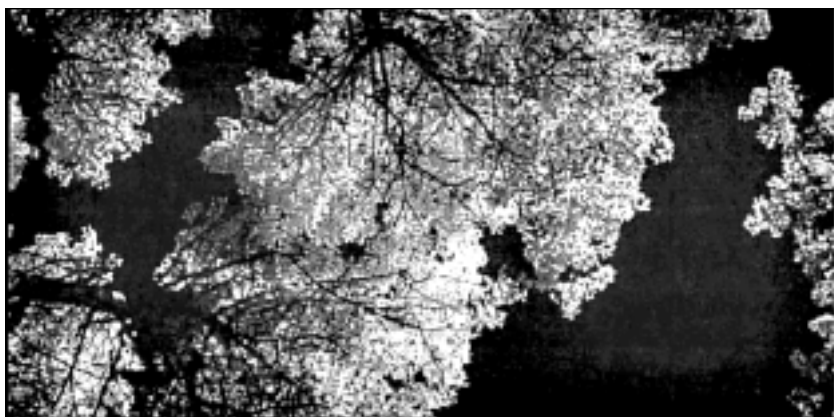


Photo.5.2. Photographie dans le proche infrarouge, acquise par le MVI sous un couvert forestier de tremble (Kucharik *et al.*, 1998).

Après classification de ces deux images (trouées, feuillage et parties non photosynthétiques), le MVI permet de quantifier l'indice foliaire en distinguant entre le feuillage situé dans les taches de lumière de celui situé dans les taches d'ombre, la distribution des angles foliaires, l'indice de bois et le facteur d'agrégation Ω_e . Les travaux de validation de (Kucharik *et al.*, 1998 et 1999) ont permis de mettre en évidence les potentialités offertes par cet instrument. Après correction des effets d'agrégation et des surfaces corticales, les estimations d'indice foliaire fournies par le MVI ont été comparées à des mesures directes allométriques, et les résultats paraissent satisfaisants. Concernant le facteur d'agrégation, des estimations par le MVI ont été comparées à celles obtenues par le TRAC et, selon les sites étudiés, les résultats sont plus ou moins comparables. Notons que le MVI n'est pas commercialisé et que peu de travaux ont été réalisés avec cet instrument. Le tableau 5.1 fournit quelques estimations de Ω_e obtenues par le TRAC et le MVI.

Tab. 5.1. Facteur d'agrégation estimé par le TRAC et le MVI (a Chen,1996 ; b Kucharik *et al.*, 1999 ;c Gower *et al.*,1999).

Peuplement	Age (ans)	Hauteur (m)	Densité (arbres/ha)	Facteur d'agrégation Ω_e
<i>Pinus banksiana</i>	60-75	12-15	1 600-2 400	0,71 TRAC ^a
<i>Pinus banksiana</i>	11-16	4-5	400-4 100	0,71 TRAC ^a
<i>Pinus banksiana</i>	50-65	9-13,5	1 300-2 600	0,82 TRAC ^{a,b} 0,45 MVI ^b
<i>Pinus banksiana</i>	25	0-2,5	5 700-42 000	0,95 TRAC ^a
<i>Picea mariana</i>	0-155	0-11	3 700-4 400	0,70 TRAC ^{a,b} 0,35 MVI ^b
<i>Populus tremuloides</i>	–	–	–	0,72 TRAC ^b 0,64 MVI ^b
<i>Accer Saccha</i>	–	–	–	0,95 MVI ^c
<i>Quercus</i>				0,88 MVI ^c
<i>Tsuga Canadensis</i>				0,94 MVI ^c

1.2. Mesure du facteur d'agrégation Ω_e

Le facteur d'agrégation Ω_e , qui représente l'agrégation des éléments foliaires à l'intérieur de la pousse, se mesure au laboratoire. Il n'existe pas de protocole de référence. Gower et Norman (1991), dans des peuplements résineux, mesurent le rapport entre la surface totale projetée des aiguilles à l'intérieur de la pousse et la surface projetée de la pousse. Seule une projection verticale a été utilisée. Ce rapport, noté R dans le guide d'utilisation du LAI-2000 PCA (Licor, 1992), est de 1,5 ($\pm 0,41$), 1,61 ($\pm 0,35$), 1,49 ($\pm 0,28$) et 1,6 ($\pm 0,14$), respectivement pour le pin rouge (*Pinus resinosa*), le pin blanc (*Pinus strobus*), le mélèze (*Larix decidua*) et l'épicéa (*Picea Abies*). Alors qu'en forêt de feuillus, l'unité de base des modèles d'estimation de l'indice foliaire est la feuille, en forêts de conifères, de nombreux travaux considèrent la pousse comme l'unité élémentaire de base. Ces travaux considèrent comme admissible l'hypothèse que la distribution des pousses est aléatoire et que l'indice des aiguilles, estimé par les méthodes indirectes, est en réalité un indice de surface de pousses (Shoot area index) (Gower et Norman, 1991 ; Chen, 1996 ; Chen et al, 1997). Pour déterminer l'indice des aiguilles, il suffit de multiplier l'indice de surface de pousses par le facteur d'agrégation de Gower et Norman (1991). C'est cette technique de correction qui est proposée dans le guide d'utilisation du PCA LAI-2000.

Cette technique de correction a été critiquée par Fassnacht *etal.* (1994) et Chen (1996). Ces derniers signalent que Gower et Norman (1991) mesurent l'indice d'agrégation en employant uniquement une projection verticale, alors que la surface projetée dépend de la position angulaire de la pousse et de la direction du rayonnement incident. Une nouvelle méthode d'estimation du facteur d'agrégation a été proposée par Fassnacht et al. (1994) et puis reprise et complétée par Chen (1996). Chen (1996) définit Ω_e comme étant le rapport entre la demi-surface totale des aiguilles A_n à la demi-surface totale de la pousse A_s : $\Omega_e = A_n / A_s$. Chen (1996) donne une expression de A_s :

$$A_s = \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi A_p(\theta, \phi) \cos \theta \, d\theta \, d\phi$$

$A_p(\theta, \phi)$ est la projection de la pousse dans une direction d'angle zénithal θ et d'azimut ϕ . θ est mesuré par rapport à la normale au plan contenant la pousse (table lumineuse), et ϕ par rapport à une direction de référence sur le même plan. A_s est mesuré en plaçant généralement la pousse sur une table lumineuse et en déterminant la surface projetée à différents angles de vue. Considérant par exemple, une pousse de forme sphérique de rayon R contenant n aiguilles de forme cylindrique, où r est le rayon de la section et l est la longueur de l'aiguille. La demi-surface totale des aiguilles à l'intérieur de la pousse est $A_n = n \pi r l$. La surface projetée de la pousse est constante et ne dépend pas de θ et ϕ . A_p est égal à R^2 . A_s est la demi-surface totale de la pousse de forme sphérique : $A_s = 1/2 (4 \pi R^2)$. Le facteur de contagion est : $\alpha_e = (n \pi r l) / (2 \pi R^2)$.

Pour des pousses de formes complexes, A_s est la demi-surface totale de l'enveloppe de la pousse. Elle peut être déterminée au laboratoire selon l'expression suivante (Chen, 1996) :

$$A_s = 2 \frac{A_p(0^\circ, 0^\circ) \cos(15^\circ) + A_p(45^\circ) \cos(45^\circ) + A_p(90^\circ, 0^\circ) \cos(75^\circ)}{\cos(15^\circ) + \cos(45^\circ) + \cos(75^\circ)}$$

Le tableau 5.2 donne quelques estimations multi-angles du facteur d'agrégation α_e :

Tab. 5.2. Quelques mesures du facteur d'agrégation α_e .

Espèces	Coefficient d'agrégation	Références
<i>Acer saccharum</i>	1,0	Gower <i>et al.</i> (1999)
<i>Quercus</i>	1,0	Gower <i>et al.</i> (1999)
<i>Populus tremuloides</i>	1,0	Gower <i>et al.</i> (1999)
<i>Pinus banksiana</i>	1,3	Chen et Cihlar (1995)
<i>Pinus banksiana</i>	1,2-1,4	Gower <i>et al.</i> (1999)
<i>Picea mariana</i>	1,3-1,4	Gower <i>et al.</i> (1999)
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	1,77	Smith <i>et al.</i> (1993)
<i>Pinus sylvestris</i>	1,75	Stenberg <i>et al.</i> (1994)
<i>Pinus resinosa</i>	2,8	Chen et Cihlar (1995)

Notons que pour déterminer le facteur d'agrégation α_e pour une espèce donnée, il est nécessaire de tenir compte de la variabilité de ce facteur en fonction du statut social de l'arbre et la hauteur d'échantillonnage. La figure 5.4 met en évidence la variabilité de α_e en fonction du statut social et de la position en hauteur de la pousse dans deux peuplements de *Pinus banksiana* et *Picea mariana*.

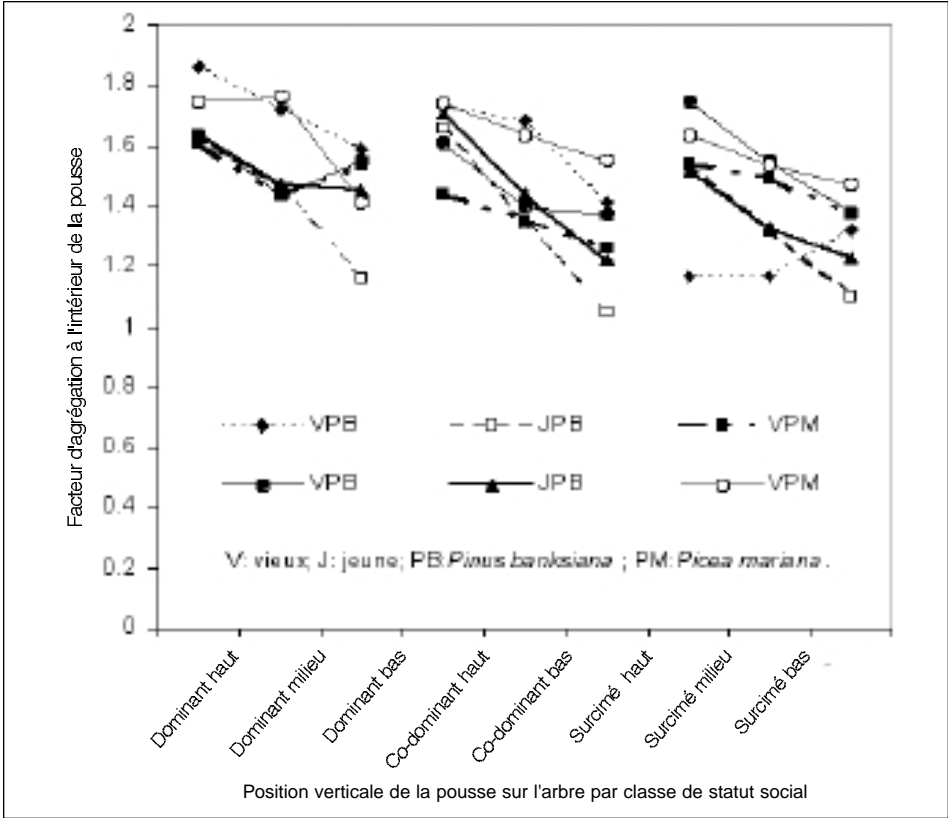


Fig.5.4. Facteur d'agrégation ϵ_e mesuré à différentes hauteurs sur arbres dominants, co-dominants et dominés (d'après les données de Chen,1996).

La figure 5.4 montre que le facteur d'agrégation ϵ_e est plus élevé en haut qu'en bas de la cime. Il est aussi plus élevé pour les dominants que pour les surcimes. Chen (1996) signale que les conditions de rayonnement semblent être le facteur contrôlant ϵ_e . Notons que pour l'ensemble du peuplement, c'est la valeur moyenne qui a été considérée.

La détermination de ϵ_e nécessite la mesure de la surface des éléments foliaires. Il existe deux catégories de méthodes permettant de déterminer la surface des éléments foliaires : (1) les planimètres optiques et les systèmes d'analyses d'images. Ces méthodes mesurent des surfaces projetées. Pour les feuilles, la surface projetée est très proche de la demi-surface totale de la feuille en considérant les deux faces. Pour les aiguilles, le passage de la surface projetée à une surface totale nécessite l'application des coefficients de correction de forme ; (2) la méthode par déplacement de volume.

1.2.1 Planimètres optiques et systèmes d'analyse d'images

Une description détaillée des ces instruments est donnée en annexe 2.

Les planimètres emploient des scanners photoélectriques ou laser. Ils ont généralement des résolutions spatiales permettant de mesurer rapidement la surface projetée et les dimensions linéaires des feuilles et des aiguilles. C'est le cas du CI-

202 Portable Leaf Area Meter, le CI-203 Portable Laser Leaf Area Meter et le CI-420 Portable Area Imager (CID, USA), le LI-3000A Portable Area Meter et LI-3100 Area Meter (LI-COR Inc, USA), le système Conveyor Belt Unit associé au logiciel WINDIAS (Delta-T Devices, U.K.).

Notons que les systèmes d'analyse d'images sont basés sur des images numérisées des feuilles ou des aiguilles et utilisent des logiciels pour déterminer les surfaces projetées et les autres caractéristiques géométriques. En outre, ces logiciels utilisent des algorithmes de classification à partir des couleurs, afin de discriminer entre les surfaces photosynthétiques, les trous et les différentes manifestations de dommages pouvant affecter les feuilles ou les aiguilles. C'est le cas des logiciels Win/MacFOLIA et Win/MacSEEDLE et NEEDLES (Régent Instruments, CAN), WINDIAS (Delta-T) et les systèmes CI-400 Computer Imaging Analysis System et le CI-410 Portable Computer Imaging Analysis System (CID, USA).

Il est important de signaler que l'estimation de l'indice foliaire ou l'indice des aiguilles, sur la base de la demi-surface totale, nécessite le passage de la surface projetée à la surface développée. Par exemple, lors de l'établissement des relations allométriques, la surface des aiguilles déterminée à l'aide des systèmes d'analyse d'images correspond à une surface projetée. L'indice ainsi estimé correspond à une surface projetée et il est inférieur à la demi-surface totale. Autrement dit, pour une aiguille de longueur l et de section circulaire de rayon r (exemple : *Pinus cembroides* var, *monophylla*), la surface projetée est $2rl$ alors que la surface totale est $2\pi rl$. Le rapport entre la surface totale et la surface projetée, noté c , est ici égal à π . Pour une aiguille de section hémicylindrique (exemple : *Pinus sylvestris*), le coefficient de correction de forme c est égal à $(1 + \pi/2)$ soit environ 2,57. Pour des feuilles parfaitement planes, ce coefficient est égal à 2. Ainsi, si on note NAI l'indice des aiguilles défini sur la base de la demi-surface totale et NAI_p l'indice projeté, ces deux quantités sont reliées par l'expression suivante : $NAI = 1/2 c NAI_p$. Alors qu'il est relativement aisé de déterminer le coefficient c pour des aiguilles de formes géométriques simples (cylindrique, hémicylindrique, plate), certaines aiguilles possèdent des sections de formes complexes (fig. 5.5) pour lesquelles la surface projetée dépend de la direction de la projection. Des projections multidirectionnelles sont donc nécessaires pour déterminer une surface projetée moyenne.

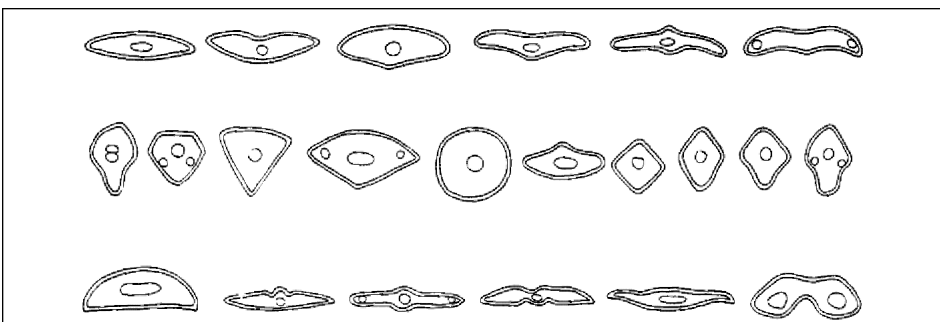


Fig.5.5. Coupe transversale d'une aiguille : la ligne du haut : *Abies concolor*, *Abies nordmanniana*, *Abies pinsapo*, *Abies arizonica*, *Taxus baccata*, *Abies amabilis*. La ligne du milieu : *Cryptomeria japonica*, *Cedrus libani*, *Pinus cembra*, *Pinus ponderosa*, *Pinus cembroides* var *monophylla*, *Picea omorika*, *Picea asperata*, *Picea polita*, *Picea Abies*, *Picea smithiana*. La ligne du bas : *Pinus sylvestris*, *Cephalotaxus fortunei*, *Larix gmelinii* var *japonica*, *Tsuga canadensis*, *Cunninghamia lanceolata*, *Sciadopitys verticillata* (source : Krüssmann, 1979).

Actuellement, le coefficient *c* est seulement déterminé pour certaines espèces. Le tableau 5.3 donne quelques mesures de ce coefficient :

Tab. 5.3. Coefficient de correction *c* pour quelques espèces de pin.

Espèces	Coefficient <i>c</i>	Références
<i>Pinus sylvestris</i>	3,0	Oker-Blom et Smolander, 1988
<i>Picea abies</i>	2,5	Oren <i>et al.</i> , 1986
<i>Pinus resinosa</i>	3,32	Johnson, 1984
<i>Pinus virginiana</i>	2,65	
<i>Pinus rigida</i>	2,70	
<i>Pinus taeda</i>	3,03	
<i>Pinus pumila</i>	3,08	
<i>Pinus strobus</i>	3,05	

1.2.2. Méthode de déplacement de volume

Cette méthode, simple et peu coûteuse, permet de mesurer la surface totale des aiguilles à partir du volume d'une pousse intacte ou d'un échantillon. La pousse est introduite dans un bac d'eau. Le volume de la pousse est donné par le volume d'eau déplacé. La surface totale est ensuite mesurée à partir d'une relation entre le volume d'aiguilles, leur longueur moyenne, leur nombre et un facteur de correction. On présentera dans l'annexe 2 le protocole proposé par Norman J.M. et utilisé dans le cadre du projet BOREAS Boreal Ecosystem-Atmosphere Study (Norman J.M., communication personnelle).

Il est important de signaler qu'une attention particulière doit être accordée à la résolution spatiale de ces instruments. En effet, la résolution de certains instruments est insuffisante pour déterminer la surface projetée des aiguilles.

2. Indice de bois ou indice de surface non photosynthétique

Les méthodes optiques indirectes ne distinguent pas entre les surfaces foliaires et les surfaces des autres organes tels que les branches et les troncs (photos 5.3 et 5.4).



Photo 5.3. Photographie hémisphérique noir et blanc.

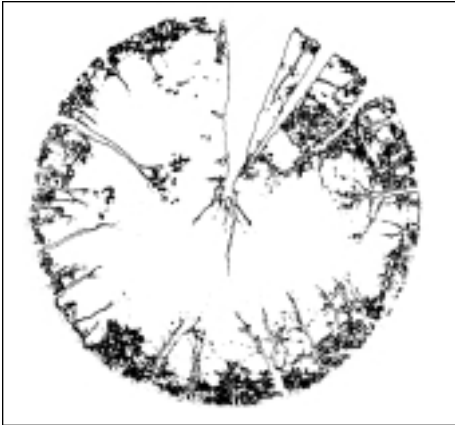


Photo 5.4. Photographie hémisphérique montrant les contours des parties corticales.

De nombreux travaux ont fourni des estimations directes et indirectes de la contribution des parties corticales. Cette contribution est exprimée par l'indice de bois WAI, qui, rappelons-le, est défini comme étant la demi-surface totale des compartiments non photosynthétiques (branches, troncs, cônes) par m² du sol. Le WAI est fortement variable. En utilisant des méthodes directes destructives, Deblonde *et al.* (1994) déterminent un WAI de 0,5 à 0,6 pour un indice d'aiguilles (NAI) de 3 à 6 dans des peuplements de *Pinus resinosa* et de 0,2 à 0,7 pour un NAI de 1,5 à 2,2 dans des peuplements de *Pinus banksiana*. Le ratio WAI/NAI est de 8 à 12 % pour *Pinus resinosa* et de 10 à 33 % pour *Pinus banksiana*. Chen (1996) détermine un rapport WAI/VAI de 17 % dans un vieux peuplement de *Picea mariana* et respectivement 28 à 32 % et 3 à 5 % dans des vieux et des jeunes peuplements de *Pinus banksiana*. Dans des peuplements de pin sylvestre (*Pinus sylvestris*), Halldin (1985) obtient un WAI de 1,4 (21 % du NAI maximum). Dans des peuplements de *Pinus radiata*, Lang *et al.* (1991) fournissent des contributions dans le NAI total de 85,5 %, 7,5 %, 5 % et 2 % respectivement pour les aiguilles vertes, les aiguilles sèches, les branches et les troncs. Dans des peuplements de pin sylvestre de Haguenau (France), Walter et Grégoire (1996) estiment le WAI à 10 % du NAI maximum. Dans des peuplements feuillus, Kruijt (1989) obtient un ratio WAI/VAI de 12 % dans des jeunes chênes. En utilisant des méthodes indirectes (PCA LAI-2000 et Demon), Dufrêne et Bréda (1995) obtiennent un ratio WAI/VAI d'environ 20 % dans des jeunes peuplements tempérés de chêne sessile, de 10 à 22 % dans des jeunes peuplements mélangés de châtaignier, de 40 % dans un peuplement âgé de hêtre, 28 % dans un peuplement adulte de chêne sessile et de hêtre et de 23 % dans un peuplement adulte de hêtre et de charme. Dans un peuplement feuillu de chêne, châtaignier et de hêtre, Cutini *et al.* (1998), en utilisant le PCA LAI-2000, obtiennent des WAI allant de 0,5 à 1 (9-38 % du VAI). Dans des peuplements adultes de chêne, hêtre et charme, en utilisant la technique de photographies hémisphériques, Soudani (1999) obtient des WAI allant de 0,62 à 1,66 (15 à 32 % du VAI).

Dans une synthèse récente, Gower *et al.* (2000) situent la contribution des parties corticales entre 5 à 35 % de l'indice végétal estimé par les méthodes indirectes. Ces auteurs notent que lorsqu'une estimation de l'indice foliaire proprement dit est souhaitée, les estimations fournies par les méthodes indirectes nécessitent des corrections des effets des branches et des troncs. Lang (1993) et Chen (1996) considèrent le VAI comme étant égal à la somme du LAI et du WAI. Dufrêne et Bréda (1995), Gower *et al.* (2000) signalent que cette égalité n'est pas toujours vraie. En effet, pour des couverts présentant des distributions aléatoires du feuillage et des surfaces corticales, l'indice foliaire LAI peut être obtenu en soustrayant l'indice de bois WAI de l'indice végétal VAI. Dans le cas contraire, la soustraction n'est pas fondée en raison du recouvrement des branches par les feuilles et inversement. Dans des canopées fermées de peuplier tremble, Kucharik *et al.* (1998) montrent que seulement 5 % des branches influencent l'estimation de l'indice foliaire, 10 % dans des peuplements de *Pinus banksiana*. Pour des canopées fermées, ces auteurs suggèrent de négliger la contribution des branches et d'effectuer seulement une légère correction pour tenir compte de la contribution des troncs.

Conclusion

Les travaux cités ci-dessus mettent en évidence l'importance des considérations théoriques pour l'interprétation des estimations d'indice foliaire obtenues par les

méthodes indirectes. L'utilisateur doit garder à l'esprit les hypothèses à la base des modèles de calcul employés. Une analyse fine de la distribution zénithale des trouées permet de juger la validité de ces estimations et d'éliminer les erreurs dues à l'inadéquation de ces modèles à la distribution très irrégulière des trouées en certains points d'acquisition.

La littérature scientifique concernant l'estimation de l'indice foliaire est particulièrement riche. De nombreux travaux en cours cherchent à améliorer les estimations d'indice foliaire en prenant mieux en compte l'hétérogénéité et la complexité structurale des canopées forestières. Bien que les travaux de validation du TRAC et du MVI demeurent insuffisants, ces deux instruments ont permis de mieux tenir compte de la nature agrégative de la distribution des éléments foliaires au sein du couvert forestier.

Conclusion générale

Réflexions à propos du choix du descripteur du couvert dans diverses applications forestières

Après avoir détaillé les différents équipements et logiciels de traitement actuellement disponibles, il nous semble important de rappeler que les différents descripteurs du couvert présentés dans ce document sont plus ou moins pertinents en regard des objectifs de l'utilisateur. Rappelons aussi que nous n'avons pas fait état dans cet ouvrage des appréciations visuelles quantitatives (état des cimes, pertes foliaires, jaunissement...), qui se situent entre métrologie et symptomatologie. De nombreux travaux sont disponibles sur ce point auprès du Département de la Santé des Forêts (DSF), depuis des guides de notation, des analyses de travaux d'intercalibrations de notateurs jusqu'à des critiques sur les dérives de notations temporelles ou spatiales (entre régions ou pays).

Les paramètres dépendants de la structure des couverts forestiers sont nombreux et le descripteur le plus pertinent doit être réfléchi selon l'objectif de l'utilisateur. Si le taux de couvert, le pourcentage de ciel ou la fraction de trouée peuvent parfois convenir, une mesure précise de l'indice foliaire sera, dans d'autres situations, nécessaire. Dans d'autres cas encore, un calcul de rayonnement sous couvert (site factors, transmittance) sera préféré. **Il est donc essentiel, avant de se poser la question technique de l'équipement à utiliser, de clairement définir ses besoins et la variable recherchée.** Certes, les techniques les plus sophistiquées permettent d'obtenir simultanément la plupart de ces descripteurs, mais la mise en œuvre et le coût des équipements sont parfois limitants ou tout au moins contraignants. À l'aide de quelques exemples d'application dans lesquels des descripteurs du couvert sont recherchés, quelques réflexions quant au choix du paramètre à mesurer sont données ci-dessous. Le choix technique du matériel est alors déjà partiellement fléché.

Le gestionnaire de réseau de surveillance sanitaire des forêts est préoccupé par une mesure fiable et reproductible de l'état du couvert, et s'intéressera plutôt à une dynamique interannuelle de l'état de fermeture ou de porosité du couvert, qui peut être mesurée par une fraction de trouées ou un pourcentage de ciel. Ponctuellement, l'incidence d'une perturbation accidentelle sur la structure des couverts forestiers (gel, attaque biotique, chablis, bris de glace...) devra être évaluée plus précisément, y compris éventuellement en dynamique saisonnière. Un calcul d'indice foliaire à partir d'un analyseur de couvert ou de photographies hémisphériques sur un échantillonnage piqueté au sol pourrait alors être utile. Dans le cadre des surveillances à l'échelle des placettes permanentes du réseau européen, les observations de l'état des cimes sont actuellement réalisées visuellement à l'échelle de l'arbre. Une mesure de la fermeture du couvert ou de son indice foliaire pourrait présenter l'atout majeur d'être reproductible dans le temps, mais sa pertinence serait à l'échelle de la placette et non des arbres individuellement. Toutefois, les notations visuelles faites individuellement sont pratiquement

systématiquement traitées en moyenne par placette, en raison du manque de fiabilité de l'appréciation visuelle arbre par arbre dans le temps. L'inconvénient majeur d'une mesure de l'état du couvert depuis le sol par une méthode indirecte serait de ne pouvoir distinguer la contribution du sous-étage de celle de l'étage dominant, c'est-à-dire de l'essence d'intérêt. C'est en ce sens que les collectes ettrris de litières, telles que celles réalisées sur RENECOFOR sont les plus pertinentes, même si elles ne permettent pas actuellement d'aller plus loin que la mesure de biomasse de retombées annuelles. Il ne resterait qu'à déterminer la surface spécifique des litières pour atteindre le paramètre indice foliaire et ainsi valoriser au maximum l'effort considérable de récolte et tri actuellement réalisé. Notons que cette remarque concerne bon nombre de placettes du réseau européen, puisque seuls quelques pays déterminent actuellement l'indice foliaire bien que les litières soient récoltées et triées.

Le phytosociologue souhaitera caractériser un microclimat lumineux sous couvert, lui permettant d'expliquer la distribution de cortèges floristiques ou de préciser les profils écologiques et les valeurs indicatrices pour la lumière des espèces ; les taux de recouvrement actuellement utilisés et souvent difficiles à apprécier visuellement pourraient être avantageusement remplacés par des sites factors ou des mesures intégrées de rayonnement sous couvert. L'indice foliaire du couvert forestier au sens strict n'est ici pas nécessairement le paramètre le plus pertinent. En revanche, les taux de recouvrement des espèces très envahissantes (fougères, ronces...) pourraient être estimés par une mesure d'indice foliaire de cette strate.

Le sylviculteur caractérise l'intensité de ses interventions sylvicoles en termes de volume prélevé mais il s'intéresse aussi aux conséquences de l'ouverture du couvert sur le fonctionnement et la productivité de sa parcelle. Comment les bilans hydrique et carboné sont-ils modifiés par l'éclaircie et comment la productivité de la parcelle va-t-elle être modifiée ? Dans ce cas, c'est une mesure d'indice foliaire qui permettrait d'interpréter l'impact de l'intervention en termes de modifications du fonctionnement écophysiologique du peuplement. Un certain nombre d'informations, quant aux relations entre proportion de surface terrière ôtée en éclaircie et réduction d'indice foliaire, pourrait également être caractérisé, par la mesure indirecte d'indices foliaires pour différentes intensités d'intervention, pour diverses essences, dans des conditions variées d'âges et de milieux. Ensuite, la dynamique de fermeture du couvert après l'éclaircie pourrait être caractérisée par l'évolution de l'indice foliaire au cours du temps, et pourrait permettre de déterminer une périodicité optimale d'intervention. De nouvelles directives sylvicoles, reposant sur un équilibre entre indice foliaire et contexte local (sol, climat) pour une espèce donnée, sont à encourager. Dans les régénérations naturelles après coupe d'ensemencement ou après tempête, le gestionnaire pourrait caractériser le microclimat lumineux sous le couvert des semenciers ou caractériser l'incidence d'abris latéraux. Cette approche fonctionnelle et quantitative de la sylviculture nous semble dès à présent accessible.

Les inventaires forestiers caractérisent et définissent des structures de peuplements sur des critères dendrométriques mesurés au sol ou sur des critères photographiques par survol aérien. Le couplage des informations relatives à la canopée, appréciées au sol et par des capteurs aéroportés, mériterait d'être développés en France. Dans ce cas, des indices de végétations télédéteçtés,

confrontés et validés par des indices foliaires mesurés au sol ou estimés par relations allométriques, constitueraient un élément nouveau des inventaires forestiers, et permettraient des calculs spatialisés de productivité non plus seulement dendrométriques mais utilisant des modèles fonctionnels.

En typologie des peuplements, le degré de fermeture du couvert pourrait être une variable complémentaire à la distribution des tiges par catégories de bois et par étage. En effet, la distribution du nombre ou de la surface terrière des tiges ne suffit pas à définir l'état du couvert. La distribution horizontale et la taille des houppiers interviennent sur la fermeture du couvert. Une mesure d'indice foliaire ou de fraction de trouées constituerait une variable typologique intégrative forte.

L'hydrologue s'intéressera à l'incidence de la forêt sur les bilans entrées-sorties d'eau dans un bassin versant, et souhaitera caractériser les indices foliaires des peuplements pour en évaluer leur évapotranspiration, leur capacité d'interception, de réservoir ou de frein aux écoulements. Actuellement, les cartes d'occupation du sol sont utilisées mais encore rarement traduites en indice foliaire, qui détermine pourtant l'importance des flux principaux (évapotranspiration et interception des précipitations). Là encore, une approche couplée des indices de végétation au sol et par télédétection pourrait être développée.

Les calculs de bilans minéraux s'intéressent à la fois à la quantité de retour annuel de litière (biomasses) et aux teneurs foliaires des litières. L'importance quantitative des litières d'une part, le microclimat régnant au niveau du sol tant du point de vue hydrique que radiatif, détermine une part importante du type d'humus et de sa vitesse de dégradation et de minéralisation. L'indice foliaire joue ici donc un double rôle, direct et indirect. Il s'agit d'un élément important du fonctionnement biogéochimique. La détermination couplée des biomasses de litières et du microclimat sous le couvert forestier est donc importante.

Par ailleurs, la part des dépôts atmosphériques dans les bilans minéraux ou plus spécifiquement dans les études de pollution est à mettre en relation avec la structure des couverts et éventuellement avec des mesures précises de l'indice foliaire, qui représente la surface d'interception et de captation. De plus, les quantités d'éléments non retenus par les canopées sont liées à la pluie atteignant le sol (pluiolessivats), elle-même inversement proportionnelle à l'indice foliaire pour un événement pluvieux donné. La composition des pluiolessivats peut aussi résulter des transformations subies lors du passage de la pluie à travers le couvert forestier.

Les travaux portant sur les potentialités de fixation de carbone par les écosystèmes forestiers utilisent des modèles de productivité dans lesquels l'indice foliaire pilote l'essentiel des échanges. Là encore, l'indice foliaire des peuplements est une variable clé qui n'est pas disponible à l'échelle des grands types de forêts françaises ou du territoire. Une caractérisation des indices foliaires croisant les grandes essences forestières et les modes de gestion (s'appuyant par exemple sur les classifications utilisées par l'IFN) serait aussi à initier.

Ces différents exemples illustrent que la valeur absolue et juste de l'indice foliaire (méthode directe par collecte et tri de litières, estimation des surfaces spécifiques) n'est pas toujours indispensable. Les paramètres alternatifs (transmittance du

rayonnement global ou du PAR, fractions de trouées du couvert, site factors, VAI ou PAI estimé par les méthodes indirectes, indices de végétation télédétectés, biomasses foliaires...) peuvent être mieux adaptés aux objectifs de l'utilisateur et orienteront le choix technique d'une méthode et d'un équipement.

Les suggestions proposées dans les exemples ci-dessus sont restées volontairement cantonnées à de grandes lignes directrices, illustrées pour quelques applications. En effet, il ne nous semble pas souhaitable de dresser une clé universelle de choix de méthodes, mais préférable de réfléchir au cas par cas. Les contraintes du site d'étude (pente, hauteur du couvert, taille des placeaux à décrire, effet de lisières, cloisonnement ou chemins dans la zone d'étude...), l'accessibilité à une mesure de référence hors couvert sont autant d'éléments à prendre en compte. Après avoir défini ses objectifs, l'utilisateur devra souvent se résoudre au final à un compromis entre les contraintes techniques et théoriques des mesures, les contraintes spécifiques du site d'étude, le coût de l'appareil à mettre en œuvre et le temps nécessaire à la prise de mesure puis à son exploitation. La reproductibilité de la mesure dans le temps ou entre sites devrait aussi constituer un argument de choix et contribuer à la motivation de l'opérateur.

Bibliographie

- ALBREKSTON A. 1984
Sapwood basal area and needle mass of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) trees in Central Sweden.
Forestry, 57 (1), 35-43
- ALEXANDRE D.Y., 1981
L'indice foliaire des forêts tropicales.
Analyse bibliographique.
Acta Oecologica, 2 (4), 299-312
- ANDERSON M.C., 1964
Studies of the woodland light climate. I. The photographic computation of light conditions.
Journal of Ecology, 1964, 52, pp 27-41
- Andrieu B., BARET F., 1993
Indirect methods of estimating crop structure from optical measurements
in: VARLET-GRANCHER C., BONHOMME R., SINOQUET H.(Eds.), Crop structure and light microclimate: characterization and applications, Sciences Update, INRA Editions, Paris, 1993, pp. 285-322
- ASNER G.P., 1998
Biophysical and biochemical sources of variability in canopy reflectance
Remote sensing of environment 64: 234-253
- ASNER G.P., Wessman C.A., and BATESON C.A., 1998
Sources of variability in plant canopy hyperspectral reflectance data in a savanna ecosystem
Proceedings of the 7th Annual JPL Airborne Earth Science Workshop 1: 23-32
- ASNER G.P., BATESON C.A., TOWNSEND A.R., and WESSMAN C.A., 1999
Resolving vegetation condition and biogeochemical processes using hyperspectral BRDF inverse modelling
Proceedings of the 8th Annual JPL Airborne Earth Science Workshop, 37-46
- ASRAR G., FUCHS M., KANEMASU E. T., HATFIELD J. L., 1984
Estimating absorbed photosynthetic radiation and leaf area index from spectral reflectance in Wheat
Agronomy Journal, 76, 300-306
- ASRAR G., KANEMASU E.T., JACKSON R. D., PINTER P. J., 1985
Estimation of total above ground phytomass production using remotely sensed data
Remote Sensing of Environment, 17, 211-220
- AUSSENAC G., 1968
Interception des précipitations par le couvert forestier
Ann. Sci. For., 25 (3), 135-156
- AUSSENAC G., 1975
Couverts forestiers et facteurs de climat : leurs interactions, conséquences physiologiques chez quelques résineux. Thèse de Doctorat, Nancy, 234 p.
- AUSSENAC G., DUCREY M., 1977
Etude bioclimatique d'une futaie feuillue (*Fagus sylvatica* L. et *Quercus sessiliflora* Salisb) de l'Est de la France.
I. Analyse des profils microclimatiques et des caractéristiques anatomiques et morphologiques de l'appareil foliaire
Ann.Sci.For., 34, 265-284
- AUSSENAC G., BOULANGEAT C., 1980
Interception des précipitations et évapotranspiration réelle des peuplements de feuillu (*Fagus sylvatica* L.) et de résineux (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.)).
Ann. Sci. For., 37 (2), 91-107
- AUSSENAC G., GRANIER A., BRÉDA N., 1995
Effets des modifications de la structure du couvert forestier sur le bilan hydrique, l'état hydrique des arbres et la croissance
Rev. For. Fr. XLVII-1-1995, 54-62
- BARCLAY H.J., TROFYMOW J.A., LEACH R.I., 2000
Assessing bias from boles in calculating leaf area index in immature Douglas-fir with LI-COR canopy analyser
Agricultural and Forest Meteorology, 100, 255-260
- BARET F., 1986
Contribution au suivi radiométrique de cultures de céréales.
Thèse de doctorat, Université de Paris Sud, 182p.

- BARET F., GUYOT G., MAJOR D., 1989a
TSAVI: a vegetation index which minimizes soil brightness effects on LAI and APAR estimation
12th Canadian Symposium on Remote Sensing and IGARSS'90, Vancouver, Canada, 3, 1355-1358
- BARET F., GUYOT G. and MAJOR D., 1989b
Crop biomass evaluation using radiometric measurements
Photogrammetria, 43, 241-256
- BARET F., GUYOT G., 1991
Potentials and limits of vegetation indices for LAI and PAR assessment
Remote Sensing of Environment, 35, 161-173
- BARET F., MICHAEL C., SOHBI Y., 1996
Les mesures de télédétection dans le domaine solaire. Du couvert végétal à la région.
Actes de l'Ecole Chercheurs INRA en Bioclimatologie. Le Croisic, 25-29 mars, 1996. Tome 2 : Du couvert végétal à la région, pp. 53-67.
INRA- Service des Editions
Route de Saint-Cyr F78026 versailles Cedex.
- BARTHÉLÉMEY F., BALAISE F., FOURCAUD T., NICOLINI E., 1995
Modélisation et simulation de l'architecture des arbres : bilan et perspectives
Revue forestière française, 1995, numéro spécial Modélisation de la croissance des arbres forestiers et de la qualité des bois, 71-96
- BECKER M., 1971.
Une technique nouvelle d'utilisation des photographies hémisphériques pour la mesure du climat lumineux en forêt
Ann. Sci. For., 28, 425-442
- BENALLEGUE M., NORMAND M., GALLE S., DECHAMBRE M., TACONET O., VIDAL-MADIAR D., Prévot L., 1994
Soil moisture assessment at a basin scale using active microwave remote sensing: the Agriscatt'88 Airborne Campaign on the Orgeval watershed
Int. J. Remote Sensing, 15 (3), 645-656
- BERGONZINI J.-C., 2002.
En effeuillant la canopée
ECOFOR, 100 p.
- BOISSARD P., SOHBI Y., 1995
Structure géométrique tridimensionnelle des couverts végétaux
Actes de l'Ecole-Chercheurs INRA en Bioclimatologie. Le Croisic, 3-7 Avril, 1995. Tome 1: De la plante au couvert végétal, pp. 311-348. Département de Bioclimatologie INRA F78850 Thiverval-Grignon
- BOLSTAD P.V., GOWER S.T., 1990
Estimation of leaf area index in fourteen southern Wisconsin forest stands using a portable radiometer
Tree Physiology, 7, 115-124
- BONHOMME R., 1970
Application de la technique des photographies hémisphériques *in situ* à la mesure de l'indice foliaire
In : Technique d'étude des facteurs physiques de la biosphère.
INRA, Paris, pp 501-505
- BONHOMME R., 1974
Détermination des profils d'indice foliaire et de rayonnement dans un couvert végétal à l'aide de photographies hémisphériques faites *in situ*
Thèse de Docteur-ingénieur, présentée à l'université d'Aix-Marseille, 1974, 30 p.
- BONHOMME R., 1993
The solar radiation: characterization and distribution in the canopy
in: VARLET-GRANCHER C., BONHOMME R., SINOQUET H.(Eds.), Crop structure and light microclimate: characterization and applications, Sciences Update, INRA Editions, Paris, 1993, pp. 17-28
- BONN F., ROCHON G., 1992
Précis de télédétection
Volume 1, Principes et méthodes
Presses de l'Université du Québec/AUPELF
- BONN F., 1996
Précis de télédétection
Volume 2, Applications Thématiques
Presses de l'Université du Québec/AUPELF
- BRÉDA N., 1999
L'indice foliaire des couverts forestiers : mesure, variabilité et rôle fonctionnel
Rev. For. Fr. LI-2-1999, 135-150

- BRÉDA N., GRANIER A., AUSSENAC G., 1995
Effects of thinning on soil and tree water relations, transpiration and growth in an oak forest (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.)
Tree Physiology, 1995, 295-306
- BRÉDA N., LANDMANN G., 2001
Inquiries into practices and results gained in countries from European Union.
Sub-group "litterfall" from expert panel "Crown condition" of the PIC Forest and European Union Scheme on the protection of forests against atmospheric pollution, May 2001
- BRENNER A. J., CUETO ROMERO M., GARCIA HARO J., GILABERT M.A., INCOLL L. D., MARTINEZ FERNANDEZ J., PORTER E., PUGNAIRE F. I., YOUNIS M. T., 1995.
A comparison of direct and indirect methods for measuring leaf and surface areas of individual bushes
Plant, Cell and Environment, 18, 1332-1340
- BRIX H., MITCHEL A.K., 1983
Thinning and nitrogen fertilization effects on sapwood development and relationships of foliage quantity to sapwood area and basal area in Douglas-fir
Can. J. For. Res., 13, 384-389
- BROWN N.D., 1993
The implications of climate and gap microclimate for seedling growth conditions in a Bornean lowland rain forest
Journal of Tropical Ecology, 9, 153-168
- BURTON A.J., PREGITZER K.S., REED D.D., 1991
Leaf area and foliar biomass relationships in Northern hardwood forests located along an 800 km acid deposition gradient
Forest Science, 37(4), 1041-1059
- BOTKIN D.B., 1986
Remote sensing of the biosphere
Report of the committee on planetary biology, National Academy of Sciences, Washington DC, USA
- CAMPBELL G.S., 1986
Extinction coefficients for radiation in plant canopies calculated using an ellipsoidal inclination angle distribution
Agricultural and forest Meteorology, 36, 317-321
- CAMPBELL G.S., 1990
Derivation of an angle density function canopies with ellipsoidal leaf angle distributions
Agricultural and Forest Meteorology, 49, 173-176
CAMPBELL G.S., 1981
Principles of radiation and temperature relations
In: LANGE O.L., NOBEL P.S., OSMOND C.B. & ZIEGLER H.(Editors), Physiological Plant Ecology I. Responses to the physical environment (Encyclopedia of Plant Physiology, 12 A). Springer, New York, USA
- CHAMPION I., WIGNERON J.P, BRÉDA N., 1996
Variables de fonctionnement issus des données de télédétection micro-onde.
Actes de l'Ecole-Chercheurs INRA en Bioclimatologie, Le Croisic, 25-29 Mars, 1996
Tome 2 : Du couvert végétal à la région, pp.145-167. INRA- Service des Editions Route de Saint-Cyr F78026 Versailles Cedex.
- CHARTIER P., 1967
Lumière, eau et production de matière sèche de couvert végétal
Ann. Agron., 18 (3), 301-331
- CHARTIER M., ALLIRAND J.M., VARLET-GRANCHER C., 1993
Canopy radiation balance: its components and their measurements
In: VARLET-GRANCHER C., BONHOMME R., SINOQUET H.(Eds.), Crop structure and light microclimate: characterization and applications, Sciences Update, INRA Editions, Paris, 1993, pp. 29-45
- CHASON J., BALDOCCHI D., HUTSON M., 1991
A comparison of direct and indirect methods for estimating forest leaf area
Agricultural and Forest Meteorology, 57, 107-128
- CHASSAGNEUX P., CHOISNEL E., 1986
Modélisation de l'évaporation globale d'un couvert forestier. I- Principes physiques et description du modèle
Ann. Sci. For., 43 (4), 505-520
- CHASSAGNEUX P., CHOISNEL E., 1987
Modélisation de l'évaporation globale d'un couvert forestier.
II- Calibrages et résultats du modèle
Ann. Sci. For., 44 (2), 171-188

- CHEN J.M., BLACK T.A., ADAMS R.S., 1991
Evaluation of hemispherical photography for determining plant area index and geometry of a forest stand
Agricultural and Forest Meteorology, 56, 129-143
- CHEN J.M., BLACK T.A., 1992
Defining leaf area index for non-flat leaves
Plant, Cell Environ., 15, 421-429
- CHEN J.M., CIHLAR J., 1995
Quantifying the effect of canopy architecture on optical measurements of leaf area index using two gap size analysis methods
IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing, 33, 777-787
- CHEN J.M., 1996
Optically-based methods for measuring seasonal variation of leaf area index in boreal conifer stands
Agricultural and Forest Meteorology, 80, 135-163
- CHEN J.M., LEBLANC S.G., 1997
A 4-scale bidirectional reflection model based on canopy architecture
IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 35, 1316-1337
- CHEN J.M., RICH P.M., GOWER T.S., NORMAN J.M., PULMER S., 1997
Leaf area index on boreal forests: theory, techniques and measurements
Journal of Geophysical Research, 102 (D24), 29, 429-444
- CHEN J. M. , LEBLANC S. G. , WHITE H. P. 1999
Compact Airborne Spectrographic Imager (CASI) used for mapping biophysical parameters of boreal forests
Journal of Geophysical Research, Atmospheres, Vol. 104, No 22
- CHEN J.M., LEBLANC S. G., 2000
A Geometrical multiple scattering scheme to be used in geometrical optical models.
Soumis à IEEE TGARS
- CHOUDHURY B. J., 1987
Relationships between vegetation indices, radiation absorption and net photosynthesis evaluated by sensitivity analysis
Remote Sensing of Environment, 22, 209-233
- CLEVERS J. G. P. W., 1986
The application of a vegetation index in correcting the infrared reflectance for soil background
Symp. on Remote Sensing for Ressources Development and Environmental Management. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 26, 221-226
- CLEVERS J.G.P.W., 1989
The application of a weighted infrared-red vegetation index for estimating leaf area index by correcting for soil moisture
Remote Sensing of Environment, 29, pp 25-37
- COMEAU P., GENDRON F., LETCHFORD T., 1998
A comparison of several methods for estimating light under a paper birch mixwood stand
Can. J. For. Res., 28, 1843-1850.
- COURNAC L., DUBOIS M.-A., CHAVE J., RIÉRA B., 2000
Fast determination of light availability and leaf area index in tropical forests
J. of Tropical Ecology, in press
- CRESSIE N.A., 1991
Statistics for Spatial Data
John Wiley and Sons
- CUTINI A., MATTEUCCI G., MUGNOZZA G.S., 1998
Estimating of leaf area index with the Li-Cor LAI 2000 in deciduous forests
Forest Ecology and Management, 105, 55-65
- DAUGHTRY C.S.T., 1990
Direct measurements of canopy structure
Remote Sens. Rev., 5, 45-60
- DAWSON T.P., CURRAN P.J., PLUMMER S.E., 1998
LIBERTY - Modelling the effects of leaf biochemistry on reflectance spectra
Remote Sensing Environ., 65, 50-60
- DEBLONDE G., PENNER M., ROYER A., 1994
Measuring leaf area index with LI-COR LAI-2000 in pine stands
Ecology, 75, 527-1511

- DESHAYES M., STACH N., MALPHETTES C.-B., 1997
Utilisation des images satellitales pour l'observation des défoliations dues au Bombyx Disparate en forêt de Haguenau
Les cahiers du DSF, 1-1998 (La santé des forêts [France] en 1997), Min. Agri, Pêche (DERF), Paris, pp.87-89
- DENMEAD O.T., 1969
Comparative micrometeorology of a wheat field and a forest of *Pinus radiata*
Agric. For. Meteorol., 6, 357-371
- DHÔTE J.F., 1995
Définition de scénarios d'éclaircie pour le hêtre et le chêne.
Revue forestière française, numéro spécial "Modélisation de la croissance des arbres forestiers et de la qualité des bois", pp. 106-110
- DREYFUS Ph., BONNET F.R., 1995
CAPSIS : logiciel de simulation des conduites sylvicoles
Revue forestière française, 1995, numéro spécial "Modélisation de la croissance des arbres forestiers et de la qualité des bois", pp. 111-115
- DUCREY M, 1975a
Utilisation des photographies hémisphériques pour le calcul de la perméabilité des couverts forestiers au rayonnement solaire.
I. Analyse technique de l'interception
Ann. Sci. For., 32, 73-92
- DUCREY M, 1975b
Utilisation des photographies hémisphériques pour le calcul de la perméabilité des couverts forestiers au rayonnement solaire.
II. Etude expérimentale
Ann. Sci. For., 32, 205-221
- DUCREY M, HUC R., 1999
Effets de l'éclaircie sur la croissance et le fonctionnement écophysologique d'un taillis de chêne vert
Rev. For. Fr. LI-2, 326-339
- DUFRENE E., BRÉDA N., 1995
Estimation of deciduous forest leaf area index using direct and indirect methods.
Oecologia, 104, 156-162
- DUPONT P. 1990
Evolution temporelle de la rétrodiffusion radar bande C, causée par l'humidité du sol et par les changements de la morphologie du couvert
Mémoire MSc Géographie, Université de Sherbrooke, Septembre 1990, 49 p.
- EASTER M.J., SPIES T.A., 1994
Using hemispherical photography for estimating photosynthetic photon flux density under canopies and in gaps in Douglas-fir forests of the Pacific Northwest
Can. J. For.Res., 24, 2050-2058
- EERMAK, J., 1998
Leaf distribution in large trees and stands of the floodplain forest in southern Moravia
Tree physiology, 18, 727-737
- ENGMAN E.T., 1991
Applications of microwave Remote Sensing of soil moisture for water resources and Agriculture
Remote Sens. Environ., 35, 213-226.
- EVANS G.C. and COOMBE D.E., 1959
Hemispherical and woodland canopy photography and the light climate
Journal of Ecology, 47, pp 103-113
- FASSNACHT K.S., GOWER S.T., NORMAN J.M. and MCMURTRIE R.E., 1994
A comparison of optical and direct methods for estimating foliage surface area index in forests
Agricultural and forest Meteorology, 71, pp 183-207
- FERMENT A., PICARD N., GOURLET-FLEURY S., BARALOTO C., 2001
A comparison of five indirect methods for characterizing the light environment in a tropical forest
Ann. For. Sci., 58, 877-891
- FOURNIER R.A., RICH P.M., LANDRY R., 1997
Hierarchical characterization of canopy architecture for boreal forest
J. Geophys. Res., 102, 445-454
- FRAZER G.W., TROFYMOW J.A., LERTZMAN, 1997
A method for estimating canopy openness, effective leaf area index,

- and photosynthetically active photon flux density using hemispherical photography and computerized image analysis techniques
Information Report BC-X-373,
Pacific Centre, Victoria B.C, Canada, 73 p.
- FRAZER G.W., FOURNIER R. A.,
TROFYMOW J.A., Hall R. J., 2001
A comparison of digital and film fisheye photography for analysis of forest canopy structure and gap light transmission.
Agricultural and Forest Meteorology, 109, 249-263
- GAMON J.A., FIELD C.B., GOULDEN M.L.,
GRIFFIN K.L., HARTLEY A.E., GREESKE J.,
PENUÉLAS J. and VALENTINI R., 1995
Relationships between NDVI, canopy structure, and photosynthesis in three Californian vegetation types
Ecological Applications, 5, 28-41
- GATES D.M., 1980
Biophysical Ecology
Springer, New York, 611 pp.
- GASTELLU-ETCHEGORRY J.P., DEMAREZ V.,
PINEL V., ZAGOLSKI F., 1996
Modelling radiative transfer in heterogeneous 3-D vegetation canopies
Remote Sens. Environ., 58, 131-156
- GHOLZ H.L., 1982
Environmental limits on aboveground net primary production, leaf area and biomass in vegetation zones of the Pacific Northwest
Ecology, 63, 469-481
- GHOLZ H.L., EWEL K.C., TESKI R.O., 1990
Water and forest productivity
Forest Ecology and Management, 30, 59-68
- GOEL N.S., STREBEL D.E., 1984
Simple Beta distribution: Representation of leaf orientation in vegetation canopies.
Agronomy Journal, 76, 800-802
- GOEL N.S., QIN W., 1994
Influences of canopy architecture on relationships between various vegetation indices and LAI and FPAR: A computer simulation
Remote Sensing Reviews, 10, 309-347
- GOND V., DE PURY D.G.G., VEROUSTRAETE F.,
CEULEMANS R., 1999
Seasonal variations in leaf area index, leaf chlorophyll, and water content; scaling-up to estimate fAPAR and carbon balance in a multilayer, multispecies temperate forest
Tree Physiology, 19, 673-679
- GRAETZ R.D., 1990
Remote sensing of terrestrial ecosystem structure: an ecologist's pragmatic view
HOBBS RJ and MOONEY HA, eds,
Remote Sensing of Biosphere Functioning, Springer, Heidelberg, pp 5-30
- GRANIER A., 1981
Etude des relations entre la section du bois d'aubier et la massen foliaire chez le douglas (*Pseudotsuga menzeisii* mirb. franco)
Ann. Sci. For., 38, 503-512
- GRANIER A, HUC R., BARIGAH S.T., 1996
Transpiration of natural rain forest and its dependence on climatic factors
Agricultural and Forest Meteorology, 78, 19-29
- GRANIER A., BRÉDA N., BIRON P.,
VILLETTE S., 1999.
A lumped water balance model to evaluate duration and intensity of drought constraints in forest stands
Ecological Modelling, 116, 269-283
- GRANIER A., LOUSTAU D., BRÉDA N., 2000
A generic model of forest canopy conductance dependent on climate, soil water availability and leaf area index
Ann. For. Sci. 57, 755-765
- GRANIER A., BIRON P., LEMOINE D., 2000
Water balance, transpiration and canopy conductance in two beech stands
Agric. For. Meteorol., 100, 291-308
- GRÉGOIRE-HIMMLER C., 1992
Détermination de l'indice foliaire par photographie hémisphérique et indice de végétation satellitaire
Mémoire de fin d'études à l'Ecole Nationale de Génie de l'Eau et de l'Environnement, Strasbourg
- GRÉGOIRE-HIMMLER C., 1995
Etude de l'hétérogénéité sub-pixellaire des milieux naturels observés par radiométrie

- spectrale: application à la modélisation de l'état de l'activité de la végétation. Thèse de Doctorat à l'Université Louis Pasteur Strasbourg, 189 p
- GRIER C.C., RUNNING S.W., 1977
Leaf Area of mature northwestern coniferous forests: relation to site water balance. *Ecology*, 58, 893-899
- GRIER C.C., LEE K.M., ARCHIBALD R.M., 1984
Effects of urea fertilization on allometric relations in young Douglas-fir trees *Can. J. For. Res.*, 14, 900-904
- GOWARD S.N., TUCKER C.J., DYE D.G., 1985
North American vegetation patterns observed with NOAA-7 advanced very high resolution radiometer *Vegetatio*, 64, 3-14
- GOWER S.T., NORMAN J.M., 1991
Rapid estimation of leaf area index in conifer and broad leaf plantations. *Ecology*, 72 (5), 1896-1900
- GOWER S.T., KUCHARIK C.J., NORMAN J., 1999
Direct and indirect estimation of leaf area index, fAPAR and net primary production of terrestrial ecosystems *Remote Sens. Environ.*, 70, 29-51
- GUO B. and PEYRON J.L., 1995
Optimisez la sylviculture à long terme des peuplements forestiers équiennes grâce au logiciel SYLOPT *Revue forestière française*, 1995, numéro spécial "Modélisation de la croissance des arbres forestiers et de la qualité des bois", pp. 120-130
- GUYOT G., 1989
Signatures spectrales des surfaces naturelles *Collection télédétection N°5*, 178 p.
- GUYOT G., GUYON D., RIOM J., 1989
Factors affecting the spectral responses of forest canopies: A review *Geocarto International*, 3, 3-17
- GUYOT G., 1997
Climatologie de l'environnement. De la plante aux écosystèmes. Editions Masson, 505 p.
- GUYOT G., RIOM J., 1988
Review of factors affecting Remote Sensing of forest canopies
Proceedings: Seminar on Remote Sensing of forest decline attributed to air pollution IASA Laxenbourg, Austria. Edition Power Research Institute
- HALLDIN S., 1985
Leaf and Bark area distribution in a pine forest
HUTCHISON B.A. and HICKS B.B. (eds), *The Forest-Atmosphere Interaction*, Reidel Publishing Company, 39-58
- HANAN N., BÉGUÉ A., 1995
A method to estimate instantaneous and daily intercepted photosynthetically active radiation using a hemispherical sensor *Agric. For. Meteorol.*, 74, 155-168
- HASSIKA P., BERBIGIER P., BONNEFOND J. M., 1997.
Measurement and modelling of the photosynthetically active radiation transmitted in a canopy of maritime pine. *Ann. Sci. For.*, 54: 715-730
- HERBERT T.J., 1987
Area projections of fisheye photographic lenses
Agricultural and Forest Meteorology, 39, 215-223
- HILL R., 1924
A lens for whole sky photographs
Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 50, pp 227-223
- HOFFER R.M., 1978
Biological and physical considerations in applying computer aided analysis techniques to remote sensor data
Remote Sensing: The quantitative approach. Editors SWAIN P.H., DAVIS S.M., McGraw-Hill book Company, pp 227-289
- HOWELL T.A., MEEK D.W., HATFIELD J.L., 1983
Relationship of photosynthetically active radiation to shortwave radiation in the San Joaquin Valley
Agric. Meteorol., 28, 157-175
- HUETE A.R., 1988
A Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI) *Remote Sensing of Environment*, 25, 295-309

- HUTCHISON B.A., MATT D.R.,
MCMILLEN R.T., 1980
Effects of sky brightness distribution
upon penetration of diffuse radiation through
canopy gaps in a deciduous forest
Agric. Meteorol., 22, 137-147
- JACQUEMOUD S., GOVAERTS Y., USTIN S.L.,
FRANGI J.P., 1997
Three dimensional representation of leaf
anatomy - Application of photon transport
*In Proc. 7th Int. Sym. Physical Measurements
and Signatures in Remote Sensing*, Courchevel
(France), 7-11 April 1997, BALKEMA A.A.
(Rotterdam, Netherlands), pp.295-302
- JACQUEMOUD S., BARET F., 1990
PROSPECT: a model of leaf optical
properties spectra
Remote Sens. Environ., 34, 75-91
- JACQUEMOUD S., USTIN S.L., 2001
Leaf optical properties: A state of the art
*In: Proc. 8th Int. Symp. Physical
Measurements & Signatures in Remote
Sensing*, Aussois (France), 8-12 January 2001,
CNES, pages 223-232
- JAPPIOT M., HAAK H., LACAZE B., 1990
Etude par télédétection des variations
inter-annuelles de l'indice foliaire d'un taillis
de châtaigniers dans les Cévennes
Bul. Soc. Ét Sc. Nat. Nîmes et Gard-1995-
Tome60, 22-29
- JARVIS P.G., LEVERENZ J.W., 1983.
Productivity of temperate, deciduous and
evergreen forests
In: Physiologica Plant Ecology IV.
Encyclopedia of plant physiology Vol.12D,
pp. 233-280 LANGE O.L., *et al.* (eds).
Springer-Verlag, New-York
- JOHNSON J.D., 1984
A rapid technique for estimating total surface
area of pine needles
Forest science, 30 (4), 913-921
- KREITH F., KREIDER J.F., 1978
Principles of solar engineering
Mc Graw Hill, New York, USA
- KRUIJT B., 1989
Estimating canopy structure of an oak forest
at several scales
Forestry, 62, 269-284
- KRÜSSMANN G., 1979
Die nadelgehölze. 3. Auflage.
Verlag Paul Parey- Berlin und Hamburg, 264 p.
- KÜBNER R., MOSANDL R., 2000
Comparison of direct and indirect estimation
of leaf area index in mature Norway spruce
stands of eastern Germany
Can. J. For. Res., 30, 440-447
- KUCHARIK C.J., NORMAN J.M.,
MURDOCK L.M., GOWER T.S., 1997
Characterizing canopy nonrandomness with
a Multiband Vegetation Imager MVI
Journal of Geophysical Research, 102 (D24),
29, 455-473
- KUCHARIK C.J., NORMAN J.M., GOWER S.T.,
1998
Measurements of branch and adjusting
indirect leaf area index measurements
Agricultural and Forest Meteorology, 91, 69-88
- KUCHARIK J.C., NORMAN J.M., GOWER S.T.,
1999
Characterization of radiation regimes
in nonrandom forest canopies: theory,
measurements, and a simplified modeling
approach
Tree Physiology 19, 695-706
- KUUSK A., 1995
A Markov chain model of canopy reflectance
Agric. For. Meteorol. 76, 221-236
- LANDSBERG J. J., WARING R. H., 1997
A generalised model of forest productivity
using simplified concepts of radiation-use
efficiency, carbon balance and partitioning
Forest Ecology and Management, 95: 209-228
- LANG A.R.G., XIANG Y., 1986
Estimation of leaf area index
from transmission of direct sunlight
in discontinuous canopies
Agricultural and Forest Meteorology, 37, 229-243
- LANG A.R.G., 1986
Leaf Area and Average leaf angle
from transmittance of direct sunlight
Aust. J. Bot., 1986, 349-355
- LANG A.R.G., 1987
Simplified estimate of leaf area index
from transmittance of the sun's beam
Agricultural and Forest Meteorology, 1987,
41, 179-186

- LANG A.R.G., 1990
An instrument for measuring canopy structure
Remote Sensing Reviews, 5, 61-71
- LANG, A.G.R., 1991
Application of some of Cauchy's theorems to estimation of surface areas of leaves, needles and branches of plants, and light transmittance
Agricultural and Forest Meteorology, 55, 191-212
- LANG A.R.G., McMURTIE R.E., BENSON M.L., 1991
Validity of surface area indices of *Pinus radiata* estimated from transmittance of sun's beam
Agricultural and Forest Meteorology, 57, 157-170
- LANG A.R.G., 1993
Cauchy's theorems and estimation of surface areas of leaves, needles and branches
In: VARLET-GRANCHER C., BONHOMME R., SINOQUET H. (Eds.), Crop structure and light microclimate: characterization and applications, Sciences Update, INRA Editions, Paris, 1993, pp. 175-183
- LEBLANC G.S., CHEN J.M., CIHLAR J., 1997
NDVI directionality in boreal forests: A model Interpretation of measurements
Canadian Journal of Remote Sensing, 23, 368-379.
- LE DANTEC V., DUFRÊNE E., SAUGIER B., 2000.
Interannual and spatial variation in maximum leaf area index of temperate deciduous stands
For. Ecol. Manage., 134, 71-81
- LEE D.W., 1987
The spectral distribution of radiation in two neotropical rainforests
Biotropica, 19, 161-166
- LICOR, 1992
LAI-2000 Plant Canopy Analyser
Operating manual, Licor
April 1992
- LIST R.J., 1984
Smithsonian meteorological tables
6th revised edition. Smithsonian Institution Press, Washington D.C., USA
- LOUSTAU D., COCHARD H., 1991
Utilisation d'une chambre de transpiration portable pour l'estimation de l'évaporation d'un sous-bois de pin maritime à molinie (*Molinia coerula* L. Moench)
Ann. Sci. For., 48, 29-45
- LOUSTAU D., PORTÉ A., BOSC A., SINOQUET H., KRUIJT B., 1999
Transpiration et photosynthèse du pin maritime : approches de modélisation du niveau de l'aiguille à l'échelle du couvert.
Rev. For. Fr. LI-2-1999 ; 266-280
- LOUSTAU D., BERBIGIER P., GRANIER A., BRUNET Y., BARIAC T., VALENTINI R., 1999
Mesure du bilan de carbone des forêts européennes : cas des sites français du projet EUROFLUX
C.R. Acad. Agric. Fr., 85, 6, 255-264
- MAKELA A., VIRTANEN K., NIKINMAA E., 1995
The effects of ring width, stem position and density on the relationship between foliage biomass and sapwood area in Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.)
Can. J. For. Res., 25, 970-977
- MALINGREAU J.P., TUCKER C.J., LAPORTE N., 1989
AVHRR for monitoring global tropical deforestation
International Journal of Remote Sensing, 10, 855-867
- MARSHALL J.D., WARING R.H., 1986
Comparison of methods of estimating leaf area index in old growth Douglas-fir
Ecology, 67, 975-979
- MARIE-F, 1999
Monitoring and Assessment of Ressources in Europe-Forest
European Commission DG XII, 4th Framework Programme. Theme 3: Space technique applied of environmental monitoring and research. Area 3.1.1: Methodological research. EARS Ltd-Delft, CEMAGREF-ENGREF Montpellier, Finnish Forest Research Institute, Helsinki, Joint Research Centre IRSA-Ispira, University of Freiburg, University of Leicester.
- MASS J.M., VOSE J.M., SWANK W.T., MARTINEZ-YRIZAR A., 1955
Seasonal changes of leaf area index (LAI) in a tropical deciduous forest in west Mexico.
Forest Ecology and Management, 74, 171-180

- MCKAUGHTON K.G. and JARVIS P.G., 1983
Predicting effects of vegetation changes on transpiration and evaporation.
Water deficits and plant growth
Kozlowski edition, Academic Press, NY,
vol.VII, pp 1-47
- MCKREE K.J., 1972
Test of current definitions of solar radiation against leaf photosynthesis data.
Agric. Meteorol., 10, 443-453
- MCKREE K.J., 1981
Photosynthetically active radiation
In: O.L. LANGE P.S. NOBEL C.B. OSMOND & H. ZIEGLER (Editors),
Physiological Plant Ecology I.
Responses to the physical environment
(Encyclopedia of Plant Physiology, 12 A).
Springer, New York, pp 44-55
MCMURTIE R. E., GHOLZ H. L., LINDER S. and GOWER S. T. 1994.
Climatic factors controlling the productivity of pine stands: a model based analysis.
Ecological Bulletins, 43: 173-188
- MEYER E.B., 1998
Etude de la structure des canopées forestières à l'aide de photographies hémisphériques zénithales numérisées.
Mémoire de Diplôme d'Etudes Approfondies en Informatique, Université Louis Pasteur de Strasbourg, 43 p.
- MILLER J.B., 1967
A formula for average foliage density
Aust. J. Bot., 15, 141-144
- MILLER E.E., NORMAN J.M, 1971
A sunfleck theory for plant canopies
I. Lengths of sunlit segments along a transect
Agronomy Journal, 63, 735-738
- MITCHEL P.L., WHITMORE T.C., 1993
Use of hemispherical photographs in forest ecology: calculation of absolute amount of radiation beneath canopy
Botany School, Geography Department, Cambridge, 39 p.
- MONSI M., SAEKI T., 1953
Über den Lichtfactor in den Pflanzengesellschaften und seine Bedeutung für die Stoffproduktion.
Jpn. J. Bot., 1953, 14, 22-52
- MONTEITH J. L., 1973
Principles of Environmental Physics
Series of students' text in Contemporary Biology, Editors: Professor E. J. W BARRINGTON, F.R.S., Professor ARTHUR J. WILLIS. Edward Arnold, 241 p.
- MONTEITH J. L., 1977
Climate and efficiency of crop production in Britain
Phil. Trans. R. Soc. London, 281: 277-294
- MOON P., SPENCER D.E., 1942
Illumination from a non-uniform sky
Trans. Illum. Eng. Soc., 37, 707-726
- MOREL A., SMITH R.C., 1974
Relation between total quanta and total energy for aquatic photosynthesis
Limno. Oceanogr., 19, 591-600
- MORRISON I.K. 1991
Effect of trap dimensions on mass of litterfall collected in an *Acer saccharum* stand in northern Ontario.
Can. J. For. Res. 21(6): 939-941
- MULLER E., 1995
Phénologie forestière révélée par l'analyse d'images thematic mapper.
C.R. Acad. Sci. Paris, Sciences de la vie/ Life sciences, 318, 993-1003
- MYNENI R.B., ASRAR G. and GERSTL S.A.W., 1990.
Radiative transfer in three dimensional leaf canopies
Transport Theory and Statistical Physics, 19, 205-250
- MYNENI R.B., ASRAR G., 1994
Atmospheric effects and spectral indices
Remote sensing of Environment, 47, 390-402
- MYNENI R.B., MAGGION S., IAQUINTA J., PRIVETTE J.L., GOBRON N., PINTY B., KIMES D.S., VERSTRAETE M.M. and WILLIAMS D.L., 1995
Optical Remote Sensing of vegetation: Modelling, Caveats and Algorithms
Remote Sensing of Environment, 5, pp 169-188
- MYNENI R.B., WILLIAMS D.L., 1994
On the relationship between FAPAR and NDVI
Remote Sens. Environ 49: 200-211

- NACKAERTS K., COPPIN P., MUYS B., HERMY M., 2000
Sampling methodology for LAI measurements with LAI-2000 in small forest stands
Agric. For. Meteorol., 101 : 247-250
- NAGELEISEN L. M., 1993
Les dépérissements d'essences feuillues en France. RFF, XLV, 605-620
- NEMANI R.R., RUNNING S.W., 1989
Estimation of regional surface resistance to evapotranspiration from NDVI and thermal-infrared AVHRR data
Journal of Applied Meteorology, 28(4), 276-284
- NEUMANN H.H., DEN HARTOG G., SHAW R.H., 1989
Leaf area measurements based on hemispheric photographs and leaf-litter collection in deciduous forest during Autumn leaf fall
Agricultural and Forest Meteorology, 45, 325-345
- NICHIPOROVICH A. A., 1961
On properties of plants as an optical system
Sov. Plant Physiol., 8, 5, 536-546
- NIINEMETS U., KULL K., 1994
Leaf weight per area and leaf size of 85 Estonian woody species in relation to shade tolerance and light availability
Forest Ecology and Management, 70, 1-10
- NILSON T., 1971
A theoretical analysis of the frequency of gaps in plant stands
Agric. Meteorol., 8, 25-38
- NIZINSKI J.J., SAUGIER B., 1988
A model of leaf budding and development for a mature *Quercus* forest
Journal Applied Ecology, 25, 643-655
- NORMAN J.M., JARVIS P.G., 1974
Photosynthesis in Sitka Spruce (*Picea sitchensis* (Bong.) Carr.)
III. Measurements of canopy structure and interception of radiation
J. Appl. Ecol., 11, 375-398
- NORMAN J.M., CAMPBELL G.S., 1989
Canopy structure
In: PEARCY R.W., EHRLINGER J.R., MOONEY H.A., RUNDEL P.W. (Eds.), *Plant Physiological Ecology: Field Methods and Instrumentation*, Chapman and Hall, London and New York, 1989, pp. 301-325
- NORMAN J.M., WELLES J.M., 1983
Radiative transfer in an array of canopies
Agron. J., 75, 481-488
- NOSATOVSKY A. I., 1947
On leaf position relative sun beams
Trans. Krasnodar Inst. Food Industry, 2, 35-44
- NORWINE J., GREGOR H., 1983
Vegetation classification based on AVHRR satellite imagery
Remote Sensing Environ., 13, 69-87.
- OKER-BLOM P & SMOLANDER, 1988
The ratio of shoot silhouette area to total needle area in scots pine
Forest science, 34 (4), 894-906
- OTTO H.J., 1998
Ecologie forestière. IDF editeur, 397 p.
- PEARSON R. L. and MILLER L. D., 1972
Remote mapping crop biomass for estimation of the productivity of the short grass prairie Pawnee National grasslands, Colorado
In Proceedings of the 8 th International Symposium on Remote sensing of Environment, ERIM, Ann Arbor, MI, pp 1357-1381.
- PEARSON J. A., FAHEY T.J., KNIGHT D.H., 1984
Biomass and leaf area in contrasting lodgepole pine forests
Can. J. For. Res., 14, 259-265
- PETERSON D.L., SPANNER M.A., RUNNING S.W. and TEUBER K.B., 1987
Relationship of Thematic Mapper Simulator data to leaf area index of temperate coniferous forest.
Remote Sensing Environ., 22, pp 323-341
- PIERCE L.L., RUNNING S.W., 1988
Rapid estimation of coniferous forest leaf area using a portable integrating radiometer
Ecology, 67, 1762-1767
- PINTY B. and VERSTRAETE M-M., 1992
GEMI: A non-linear index to monitor global vegetation for satellites. *Vegetatio*, 101, 15-20
- PINTY B., LEPRIEUR C., VERSTRAETE M-M., 1993
Towards a quantitative interpretation of vegetation indices. Part 1: Biophysical Canopy Properties and Classical Indices
Remote Sensing Reviews, 7, 127-150

- PLANCHAIS I., PONTAILLER J.Y., 1999
Validity of leaf areas and angles estimated in a beech forest from analysis of gap frequencies, using hemispherical photographs and plant canopy analyser
Ann. For. Sci., 56, 1-10
- PRÉVOT L., DOUSSAN C., CLASTRE, P., 1996
Les mesures de télédétection dans le domaine des micro-ondes actives
Actes de l'Ecole Chercheurs INRA en Bioclimatologie.
Le Croisic, 25-29 Mars, 1996.
Tome 2 : Du couvert végétal à la région, pp. 131-144. INRA- Service des Editions
Route de Saint-Cyr F78026 Versailles Cedex
- QI J., CHEHBOUNI A., HUETE A. R., KERR Y.H., SORROSHIAN S., 1994
A modified soil adjusted vegetation index
Remote Sensing Environ., 48, 119-126
- RAFFY M., SOUDANI K., TRAUTMANN J., 2002
On the variability of the LAI of homogeneous covers with respect to the surface size.
International Journal of Remote Sensing, sous presse
- RAFFY M., SOUDANI K., TRAUTMANN J., 2002
On the LAI of mixed soil-forests regions
International Journal of Remote Sensing, sous presse
- RICHARDSON A. J., WIEGAND C. L., 1977
Distinguishing vegetation from soil background information
Photogramm. Eng. Remote Sens., 43, 1541-1552
- RIOU C., VALANCOGNE C., PIÉRI P., 1989
Un modèle simple d'interception du rayonnement solaire par la vigne.
Vérification expérimentale
Agronomie, 9, 441-450
- RIPLEY B.D., 1981
Spatial Statistics
John Wiley and Sons, Inc. pp. 252
- ROBERTS J., PYMAR C.F., WALLACE J.S., PITMAN R.M., 1980
Seasonal changes in leaf area, stomatal and canopy conductances and transpiration from bracken below a forest canopy
Journal of Applied Ecology, 17, 409-422
- ROSEMA A., VERHOEF W., NOORBERGEN H., BORGNIUS J.J., 1992
A new forest light interaction model in support of forest monitoring.
Remote Sensing of Env., 42, 23-41
- ROSS J., 1981
The radiation regime and architecture of plant stands
Dr Junk W, The Hague, The Netherlands
- ROUSE J. W., HAAS R. H., SCHELL J. A., DEERING D. W. and HARLAN J. C., 1974
Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS-1.
Third Earth Resources Technology Satellite Symposium 1: pp. 309-317
- RUNNING S.W., 1984
Microclimate control of forest productivity: analysis by computer simulation of annual photosynthesis/transpiration balance in different environments
Agric. For. Meteorol., 32, 267-288
- RUNNING S.W., 1988
Computer simulation of regional evapotranspiration by integrating landscape biophysical attributes with satellite data.
Land surface evaporation, Measurement and parametrization
Edité par Schmugge T.J. and André J.C., pp. 359-369
- RUNNING S.W., COUGHAN J.C., 1988
A general model of forest ecosystem processes for regional applications: I- Hydrologic balance, canopy gas exchange and primary production processes
Ecol. Modelling, 42, 125-154
- RUNNING S.W., NEMANI R.R., PETERSON D.L., BAND L.E., POTTS D.F., PIERCE L.L., SPANNER M.A., 1989
Mapping regional forest evapotranspiration and photosynthesis by coupling satellite data with ecosystem simulation
Ecology, 70, 1090-1101
- RUNNING S. W., GOWER S. T., 1991
FOREST-BGC, a general model of forest ecosystem processes for regional applications: II Dynamic carbon allocation and nitrogen budgets
Tree Physiology, 9, 147-160

SABATIER C., 1989

Production du taillis châtaignier (*Castanea sativa*) en relation avec les caractéristiques stationnelles.

Thèse de doctorat, Université de Paris Sud, France, 231 p.

SEGUIN B., FISHER A., KERDILES H.,

LOUHALA S., PODAIRE A., 1992

Suivi agroclimatique des cultures en France à partir des données NOAA, Météosat et SPOT

In: Proceedings of the conference on the application of Remote Sensing to Agricultural Statistics

Editors : Toselli F., Meyer-Roux J.,
Commission of the European communities,
pp. 339-342.

SELLIN A., 2000

Estimating the needle area from geometric measurements: application of different calculation methods to Norway spruce
Trees, 14, 215-222

SHELBRUNE V.B., HEDDEN R.L., ALLEN R.M., 1993

The effects of site, density and sapwood permeability on the relationship between leaf area and sapwood area in loblolly pine (*Pinus taeda* L.)

Forest Ecology and Management, 58, 193-209

SINOQUET H., ANDRIEU B., 1993

The Geometrical structure of plant canopies: characterization and direct measurement methods

In: VARLET-GRANCHER C., BONHOMME R., SINOQUET H.(Eds.), Crop structure and light microclimate: characterization and applications, Sciences Update, INRA Editions, Paris, 1993, pp.131-158

SINOQUET H., VARLET-GRANCHER C. and BONHOMME R., 1993

Modelling radiative transfer within homogeneous canopies: basic concepts
In: VARLET-GRANCHER C., BONHOMME R., SINOQUET H.(Eds.), Crop structure and light microclimate: characterization and applications, Sciences Update, INRA Editions, Paris, 1993, pp. 207- 228

SINOQUET H., 1993

Modelling radiative transfer in heterogeneous canopies and intercropping systems

In: VARLET-GRANCHER C., BONHOMME R., SINOQUET H.(Eds.), Crop structure and light microclimate: characterization and applications, Sciences Update, INRA Editions, Paris, 1993, pp. 229- 252

SINOQUET H., OLIOSSO A., GUYON D., ZURFLUH O., 1995

Modélisation des transferts radiatifs dans le domaine solaire : modèles "classiques". Actes de l'Ecole Chercheurs INRA en Bioclimatologie.

Le Croisic, 3-7 Avril, 1995.

Tome 1 : De la plante au couvert végétal, pp. 333-350. Département de Bioclimatologie INRA F78850 Thiverval-Grignon.

SMITH N.J., 1993

Estimating plant area index and light extinction coefficients in stands of Douglas-fir (*Pseudotsuga Menziesii*)
Can. J. For. Res., 23, 317-321

SMITH N.J., CHEN J.M., BLACK T.A., 1993

Effects of clumping on estimates of stand leaf area index using the LI-COR LAI-2000
Canadian Journal of Forest Research, 23, 1940-1943

SMITH F.W., SAMPSON A. D., LONG N. J., 1991
Comparison of leaf area index estimates from tree allometrics and measured light interception
Forest Science, 37, 6, 1682-1688

SOUDANI K., 1994

Apports respectifs des bandes radar C et X pour la reconnaissance et la cartographie de l'occupation du sol. Tentative d'application à la mesure de la teneur en eau du sol
Mémoire de DEA, Systèmes spatiaux et aménagements régionaux, Université Louis Pasteur de Strasbourg, Octobre 1994, 61 pp.

SOUDANI K., 1999

Etude de la structure et de la dynamique spatiale et temporelle des canopées forestières : approche par méthodes optiques indirectes et par télédétection
Thèse de Doctorat de l'Université Louis Pasteur, Strasbourg, 1999, 227 pp.

SOUDANI K., RAFFY M., TRAUTMANN J., WALTER J.M., 1998

Programme National de Télédétection Spatiale 1998. Modèles nouveaux pour

- l'estimation du LAI forestier par télédétection sur unités hétérogènes. Développements théoriques et modèles associées, CNRS, Contrat N° 98RR1/0169.
- Soudani K., Trautmann J., Walter J-M., 2001
Comparaison de méthodes optiques pour estimer l'ouverture de la canopée et l'indice foliaire en forêt feuillue. Comptes rendus de l'Académie des sciences C.R.Acad.Sci, Life Science 324, 381-392.
- Soudani K., Trautmann J., Walter J-M., 2002
Leaf area index and canopy stratification in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) stands International Journal of Remote Sensing, sous presse
- Spitters C. J. T., Toussaint H. A. J. M., Goudriaan J., 1986
Separating the diffuse and direct component of global radiation and its implications for modelling canopy photosynthesis. Part I. Component of incoming radiation Agric. For. Meteorol., 38, 217-229
Sprugel D.G., 1983
Correcting for bias in log-transformed allometric equations. Ecology, 64, 209-210
- Spanner M., Pierce L.L., Peterson D.L. and Running S.W., 1990
Remote Sensing of temperate coniferous forest leaf area index: the influence of canopy closure, understory vegetation and background reflectance. International Journal of Remote Sensing, 11, 95-111
- Stenberg P., Linder S., Smolander H., Flower-Ellis J., 1994
Performances of the LAI-2000 plant canopy analyser in estimating leaf area index of some scots pine stands.. Tree Physiology, 14, 981-995
- Tan C.S., Black T.A., 1976
Factors affecting the canopy resistance of a Douglas Fir Forest
Boundary Layer Meteorology, 10, 475-488
- Ter Steege H., 1997
WINPHOT 5.0
A programme to analyse vegetation indices, light quality from hemispherical photographs Manual, Tropenbos-Guyana Reports 97-3, 52 pp.
- Tucker C.J., Townsend J.R.G. and Goff T.E., 1985
African land cover classification using satellite data
Science, 227, 369-374
- Turner D. P., Acker S. A., Means J. E., Garman S.L., 2000
Assessing alternative allometric algorithms for estimating leaf area of Douglas-fir trees and stands
Forest Ecology and Management, 126, 61-76
- Ulaby F.T., Moore R. K., Fung A.K., 1982
Microwave Remote Sensing: active and passive
Addison-Wesley, Reading, MA, 1064 pp.
- Upton G.J., Fingleton B., 1985
Vol.1: Point Pattern and Quantitative Data. John Wiley and Sons
- Upton G.J., Fingleton B., 1989
Vol.2: Categorical and Directional Data John Wiley and Sons
- Vanseveren J.P., Herbauts J., 1977
Index foliaire, paramètres foliaires et caractéristiques édaphiques stationnelles dans quelques peuplements forestiers de Lorraine belge.
Ann. Sci. For., 34, 215-229
- Varlet-Grancher C., Chartier M., Gosse G., Bonhomme R., 1981
Rayonnement utile pour la photosynthèse pour les végétaux en conditions naturelles : caractérisation et variations
Oecol. Plant., 2, 189-202
- Varlet-Grancher C., Gosse G., Chartier M., Sinoquet H., Bonhomme R., Allirand J. M., 1989
Mise au point : rayonnement solaire absorbé ou intercepté par un couvert végétal
Agronomie, 9, 419-439
- Varlet-Grancher C., Julier B., Moulia B., Riopche D., 1995
Facteurs climatiques et mise en place des structures
Actes de l'Ecole Chercheurs INRA en Bioclimatologie. Le Croisic, 3-7 Avril, 1995. Tome 1 : De la plante au couvert végétal, pp. 41-60. Département de Bioclimatologie INRA F78850 Thiverval-Grignon

- VERSTRAETE M., PINTY B. and DICKINSON R., 1990
A physical model of the bidirectional reflectance of vegetation canopies. 1 Theory
Journal of Geophysical Research, 95, pp 755-765, July 20, 1990.
- VERHOEF W., 1984
Light scattering by leaf layers with application to canopy reflectance modeling: the SAIL model.
Remote Sensing Environ., 16, 125-141
- VOSE J.M., SULLIVAN N.H., CLINTON B.D. and BOLSTAD P.V., 1995
Vertical leaf area distribution, light transmittance, and the application of the Beer-Lambert Law in four mature hardwood stands in the Southern Appalachians
Canadian Journal of Forest Research, 25, 1036-1043
- VOSE J.M., SWANK W.T., 1995
Assessing seasonal leaf area dynamics and vertical leaf distribution in eastern white pine (*Pinus strobus* L.) with a portable light meter
Tree Physiology 7, 125-134
- WALSH J.W.T., 1961
The science of daylight
Mac Donald, London, 285 pp.
- WALTER J-M. N., 1994
Méthodes d'étude de la végétation
Novembre 1994, Université Louis Pasteur de Strasbourg
- WALTER J.-M. N., GRÉGOIRE-HIMMLER C., 1996
Spatial heterogeneity of a Scots pine canopy: an assessment by hemispherical photographs.
Can. J. For. Res., 26, 1610-1619
- WALTER J.-M. N., TORQUEBIAU E.F., 1997
The geometry of the canopy of a dipterocarp rain forest in Sumatra
Agric. For. Meteorol., 85, 99-115
- WALTER J-M. N., 1999
A package of Programs for the Assessment of Canopy Geometry and Transmission of Solar Radiation by Hemispherical Photographs
Part I : Canopy Geometry, Université Louis Pasteur Strasbourg I, Centre d'Etudes et de Recherches Eco-Géographiques, Groupe de Recherches en Télédétection et Spatialisation.
- WALTER J-M. N., 2001
Photographies hémisphériques des voûtes forestières. Etude du rayonnement solaire sous le couvert à l'aide du logiciel GLA" version 2.0.
Les Nouragues (Guyane française).
Note technique, 27 p.
Université Louis Pasteur Strasbourg, Centre d'études et de recherches éco-géographiques.
- WALTER J. M., RIÉRA B., COUNAC L., DUBOIS M.A., 2001
Indice foliaire en forêt sur pente : l'Inselberg des Nouragues, Guyanne Française.
Société Française de Biologie Théorique et groupe ECO-FIT, Institut d'études scientifiques de Cargèse, Corse, 12-16 Mars 2001, poster
- WANG Y.P., JARVIS P.G., 1988
Mean leaf angles for the ellipsoidal inclination angle distribution
Agricultural and Forest Meteorology, 43, 319-321
- WARING R.H., 1983
Estimating forest growth and efficiency in relation to canopy leaf area
Adv. Ecol. Res., 13, 327-354
- WARREN WILSON J., 1959
Analysis of the spatial distribution of foliage by two-dimensional point quadrats
New Phytologist, 1959, 58, pp 92-101
- WARREN WILSON J., 1960
Inclined point quadrats
New Phytologist, 1960, 59, pp 1-8
- WARREN WILSON J., 1963
Estimation of feuillage densness and foliage angle by inclined point quadrats
Aust. J. Bot., 11, 95-105
- WEINSTEIN D. A., BELOIN R. M., YANAI R. D., 1991
Modelling changes in red spruce carbon balance and allocation in response to interacting ozone and nutrient stresses
Tree Physiology, 9, 127-146

WELLES J.M., NORMAN J.M., 1991
Instrument for indirect measurement
of canopy architecture
Agron. J., 83, 818-825

WELLES J.M., 1990
Some indirect methods of estimating canopy
structure
Remote Sens. Rev., 5, 31-43

WITTAKER R.H., 1967
Gradient analysis of vegetation
Bio. Rev., 1967, 42, 207-264

WITTWER S., 1983
Land-related global habitability science issues
NASA Technical Memorandum 85841

DE WITT C.T., 1965
Photosynthesis of leaf canopies
Agric. Res. Rept. N° 663
Center for Agric. Publ. And Doc.,
Wagenungen, 57 p.

WOODMAN J.N., 1971
Variation of net photosynthesis within
the crown of a large forest-grown conifer
Photosynthetica, 1971, 5, 50-54

ZAHNER R., 1958
Hardwood understory depletes soil water
in pine stands
Forest Science, 4, 178-184

[illegible]

Instrument	Prix approximatif	Commercialisation
<p>SCANOPY DIGITAL CAMERAS : CANOPY ANALYSIS WITH DIGITAL FISHEYE IMAGING REGENT INSTRUMENTS INC. 4040 rue Blain, Quebec, Qc. G2B 5C3 CANADA Tél. : (418) 840-1347 Fax : (418) 840-1350 sales@regent.qc.ca www.regent.qc.ca Système Winscanopy Basic Système Winscanopy Regular Système Winscanopy Pro</p>	<p>3 935.00 \$ US 4 435.00 \$ US 5 435.00 \$ US</p>	<p>REGENT INSTRUMENTS INC. 4040 rue Blain, Quebec, Qc. G2B 5C3 CANADA Tél. : (418) 840-1347 Fax : (418) 840-1350 www.regent.qc.ca Le système Winscanopy comprend le logiciel WinSCANOPY, XLSCANOPY, appareil numérique DCAM-HR1, fish-eye 180°, 2 cartes mémoires 64 et 8 Mb, système d'auto-positionnement MOUNT et autres accessoires.</p>
<p>HEMIVIEW : HEMISPHERICAL CANOPY ANALYSIS Delta-T Devices Ltd 128 Low Road, Burwell, Cambridge CB50EJ-England Tél. : 01638 742 922 Fax : 01638 743 155 www.delta-t.co.uk Système digital (appareil numérique, auto-positionnement, logiciel HemiView, manuel, perche télescopique, carte mémoire 8 Mb.</p>	<p>7 000 € (HT)</p>	<p>SOLS MESURES – Instruments, systèmes et services pour la géotechnique et l'agronomie 17, rue Jean Monet Z.A des Côtes F78990 Elancourt – France Tél. : 01 30 50 34 50 Fax : 01 30 50 34 49 E-mail : sols.mesures@wanadoo.fr.</p>
<p>CI-110 DIGITAL CANOPY IMAGER CID Inc. 4018 NE 112 th Ave Suite D-8 Vancouver, WA 98682, USA Tél; : 360 254 7874 Fax : 360 254 7923 www.cid-inc.com</p>	<p>7 980 \$ USA</p>	<p>CID Inc. 4018 NE 112 th Ave Suite D-8, Vancouver, WA 98682, USA Tél. : 360 254 7874 Fax : 360 254 7923 www.cid-inc.com</p>

Annexe 2

Mesure de la surface des feuilles et des aiguilles

Planimètres et systèmes d'analyse d'images

DELTA-T Devices

128 Low Road, Burwell, Cambridge, CB50EJ-England

Tel : 01638 742 922

Fax : 01638 743 155

www.delta-t.co.uk

Delta-T commercialise un système complet d'analyse d'images couleur (512 x 512 pixels, 24 bits) pour la mesure et l'analyse des surfaces foliaires. Ce système est constitué d'une table lumineuse sur laquelle sont placées les feuilles ou les aiguilles, une caméra vidéo CCD/CL d'une résolution de 681 x 582 pixels, munie d'un objectif de 18 à 108 mm de focale ainsi qu'un logiciel WINDIAS de visualisation et d'analyse de surfaces de feuilles ou d'aiguilles numérisées.

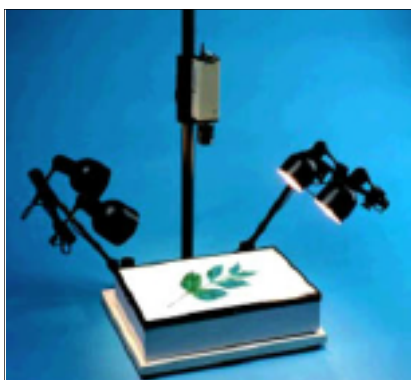
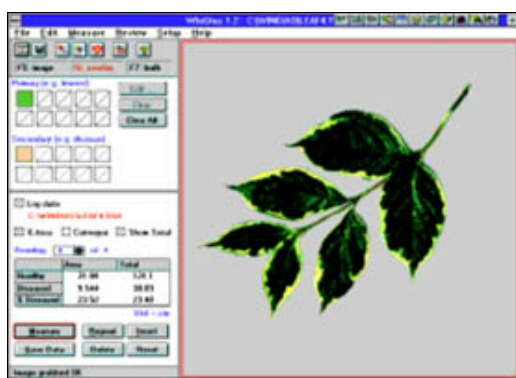


Table lumineuse et caméra vidéo
(source Delta-T Devices)



Logiciel WINDIAS d'analyse des feuilles

Le logiciel WINDIAS utilise des méthodes de classification basées sur les couleurs et permet d'analyser et de mesurer la surface et les dimensions linéaires des feuilles et des aiguilles. Il est important de signaler que pour les aiguilles, une attention particulière doit être accordée à la résolution (pixels) de l'image analysée. Si par exemple, l'image correspond à une surface réelle de 400 x 370 mm (taille maximale échantillonnée), la taille minimale d'un objet détectable sur l'image est d'une surface de $(400 \times 370) / (512 \times 512)$, soit 0,56 mm². Cette surface de 0,56 mm² est rectangulaire : $(400/512) \times (370/512)$ soit 0,78 mm x 0,72 mm. La résolution est donc meilleure dans le sens de la largeur. Pour les aiguilles de conifères, le choix de la position verticale de la caméra et la focale détermine la surface considérée par l'image et donc la taille minimale de l'objet détectable.

Delta-T commercialise aussi un instrument à tapis rotatif (Conveyor Belt Unit, type CB) d'une vitesse de 60, 100, 140, ou 190 mm/s et d'une surface de 250 x 290 mm, permettant d'automatiser les mesures de surface. A chaque passage, la surface de la feuille est automatiquement mesurée et enregistrée. Le débit de ce système est d'environ 800 feuilles/h. Ce système n'est pas adapté aux aiguilles de conifères.



Plateforme de mesure automatique de la surface foliaire (Conveyor Belt Unit de Delta-T Devices)

Delta-T commercialise aussi un planimètre portable (AM-100) permettant de mesurer la surface foliaire et les dimensions (longueur, largeur) des feuilles ou des aiguilles.

En France, les instruments Delta-T sont commercialisés par :

SOLS MESURES – Instruments, systèmes et services pour la géotechnique et l'agronomie – 17, rue Jean Monet – Z.A des Côtes – 78990 Elancourt – France.

Tél.: 01 30 50 34 50 – Télécopie : 01 30 50 34 49 – E-mail : sols.mesures@wanadoo.fr

Des informations complémentaires sur les planimètres commercialisés par Delta-T peuvent être obtenues sur le site www.dynamax.com.

Prix : (Source :SOLS MESURES)

Désignation	Réf.	Prix € (TTC)
Analyses images, feuilles, maladies...		
SYSTÈME ANALYSE D'IMAGES WINDIAS		
Système de base avec la carte couleur pour PC, le logiciel d'analyse, la caméra couleur CCD, la lentille de précision, le porte caméra, la plateforme porte-objets illuminée, lampes supérieures, ampoules et feuilles acryliques de rechange, alimentation 220	WIN BAS 230	8 300 €
SYSTEME ANALYSE D'IMAGES WINDIAS COMPLET		
Système de base avec la carte couleur pour PC, le logiciel d'analyse, la caméra couleur CCD et le tableau de couleurs, la lentille de précision, le porte-caméra, la plateforme porte-objets illuminée, lampes supérieures, ampoules et feuilles acryliques de rechange	WIN COM 230	12 000 €
Unité de convoyage des feuilles, livré avec 10 ceintures de rechange. (Conveyor Belt Unit)	CB-230/50	3 300 €

REGENT INSTRUMENTS INC.

4040 rue Blain, Quebec, Qc.

G2B 5C3 CANADA

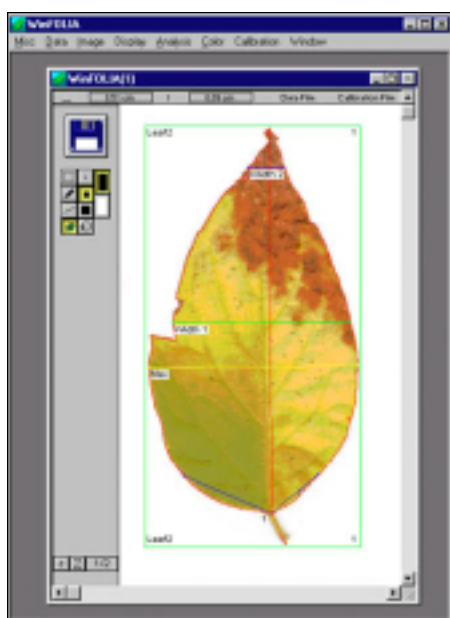
Tél. : (418) 840-1347

Fax: (418) 840-1350

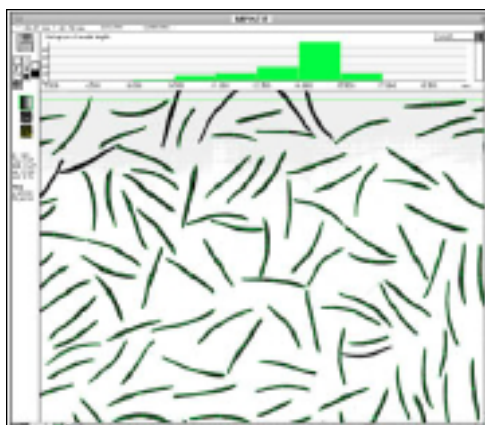
sales@regent.qc.ca

www.regent.qc.ca

Régent Instruments propose un système d'acquisition et d'analyse d'images numérisées de feuilles et d'aiguilles. Ce système comprend un scanner et deux logiciels d'analyse d'images : Win/MacFOLIA pour les feuilles plates et Win/MacSEEDLE & NEEDLES pour les graines et les aiguilles de conifères. WinFOLIA détermine les dimensions foliaires et fournit des informations sur la surface et les dimensions des trous et des nécroses. Ces dernières informations sont obtenues par des méthodes de classification basées sur les couleurs.



Interface utilisateur WinFOLIA



Interface WinSEEDLE&NEEDLE

Pour les aiguilles de conifères, le logiciel WinSEEDLE&NEEDLE analyse et calcule des informations variées telles que le nombre total d'aiguilles, la surface totale projetée, la surface moyenne et la longueur moyenne, la largeur maximale et la largeur moyenne, le volume total et moyen ainsi que la surface moyenne et totale des aiguilles. Ces derniers paramètres sont déterminés à partir de la surface projetée et des coefficients de forme.

Prix : (Source: REGENT INSTRUMENTS). Les prix concernent le logiciel, les manuels d'installation ainsi que le scanner et d'autres accessoire. Les spécifications ainsi que les prix peuvent être consultés sur le site Internet :

www.regent.qc.ca/

	Système LC	Système STD1600+	Système LA1600
Surface maximale scannée (cm²)	20 x 25	22 x 30	27 x 40
Résolution optique (dpi)	600 x 1200	1600 x 3200	800 x 1600
Prix Win/MacNEEDLE Option Regular	2 000 \$ US	3 105 \$ US	4 940 \$ US
Prix Win/MacNEEDLE Option Pro	3 500 \$ US	4 605 \$ US	6 440 \$ US
Prix Win/MacSEEDLE Option Regular	2 000 \$ US	3 400 \$ US	5 450 \$ US
Prix Win/MacSEEDLE Option Pro	3 000 \$ US	4 400 \$ US	6 450 \$ US

CID Inc.
4018 NE 112 th Ave Suite D-8, Vancouver, WA 98682, USA
Tél. : 360 254 7874
Fax : 360 254 7923
Email : sales@cid-inc.com
www.cid-inc.com

Le CID commercialise cinq instruments d'analyse et de mesure des surfaces et des dimensions foliaires. Il s'agit de deux planimètres portables (CI-202, CI-203), un planimètre portable imageur (CI-420) et deux systèmes d'analyse d'images *in situ* et au laboratoire, respectivement le CI-410 et le CI-400.



CI-202 Portable Leaf Area Meter



CI-203 Portable Laser Leaf Area Meter

Les CI-202 et CI-203 ont une résolution de 0,1 mm². Leurs poids respectifs sont de 1,36 kg et 1 kg. Le CI-203 peut être intégré à un système de tapis roulant permettant des mesures rapides.



CI-400
Computer Imaging Analysis System

CI-410
Portable Computer Imaging



CI-420 Portable Area Imager
Analysis System

Les CI-400 et le CI-420 déterminent les caractéristiques géométriques foliaires à partir d'analyses d'images.

En France, les instruments CID sont commercialisés par :

SOLS MESURES

Instruments, systèmes et services pour la géotechnique et l'agronomie

17, rue Jean Monet – Z.A des Côtes

78990 Elancourt – France.

Tél. : 01 30 50 34 50

Fax : 01 30 50 34 49

E-mail : sols.mesures@wanadoo.fr.

Prix : (Source :SOLS MESURES)

Art.	Désignation	Réf.	Qté	Px UNIT € (TTC)
1 .PLANIMETRE DE LABORATOIRE CI-202				
Planimètre à scanner, de laboratoire, résolution 0,1 mm², largeur 110 mm,poids 1,4 kg Mesures via un film protecteur de l'échantillon,mémorisation de 4000 séries de mesures (RAM 32KO), interface RS232C pour transfert,affichage direct sur 2 lignes LCD à 16 caractères				
	Paramètres mesurés :			
	• Surfaces en cm² • Longueurs en cm (largeur, longueur etpérimètre)	CI-202	1	4 750 €
2 .PLANIMETRE LASER PORTABLE CI-203				
Planimètre à laser, de terrain, compact,à haute résolution 0,1mm², poids 1 kg. Dimensions maximales de l'objet : • Largeur :150mm • Épaisseur :25mm • Longueur :infinie. Mémorisation de 15000 mesures (RAM 64KO),interface RS232C pour transfert, affichage direct sur 2 lignes LCD à 16 caractères				
	Paramètres mesurés :			
	• Surfaces en cm² • Longueurs en cm (largeur, longueur etpérimètre)	CI-203	1	8 600 €
3 .PLANIMETRE PORTABLE CI-420				
	Il comprend un scanner manuel,un mini ordinateur notebook Pentium,logiciel d'analyse d'image CI400 pré installé,batteries rechargeables haute performance,chargeur de batteire, manuel d'utilisation etcaisse de transport.	CI-420	1	10000 €
4 . SYSTEME ANALYSE IMAGES CI-400				
	Option 2 (plus économique)			
	Il comprend le logiciel d'analyse,la caméra haute résolution,digitale et couleur, les câbles de connection etl'interface standard C-mount.	CI-400 (2)	1	5 700 €
	Option 1			
	Système avec le logiciel,la carte vidéo externe, 2 câbles, un moniteur couleur 13", un visualiseur vidéo, une plate forme à objets, des lampes fluorescentes etune lumière arrière, avec autofocus et zoom.	CI-400 (1)	1	13000 €
5 . SYSTEME ANALYSE IMAGES PORTABLE CI-410				
	Il comprend le logiciel d'analyse, la caméra haute résolution,la plateforme portable, un mini ordinateur Pentium, une batterie haute performance etson chargeur, un manuel d'utilisation et la caisse de transport.	CI-410	1	10 800 €

LI-COR, Inc

Box 4425 / 4421 Superior St.

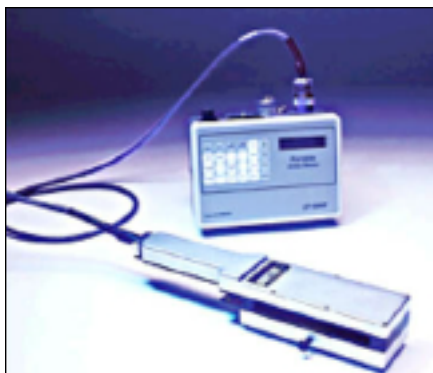
Lincoln, Nebraska 68504 USA

Tél. : 402-467-3576, 800-447-3576.

Fax : 402-467-2819

www.licor.com

La firme LI-COR commercialise deux planimètres : LI-3000 A Portable Area Meter et LI-3100 Area Meter.

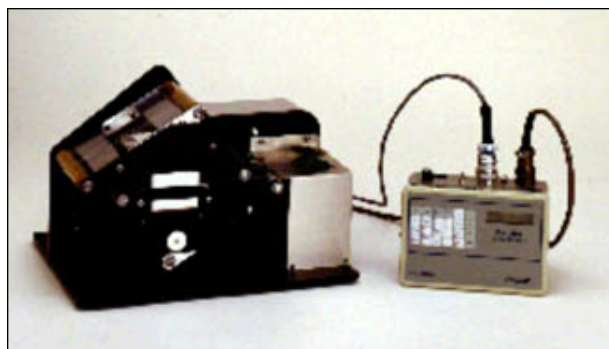


LI-3000 A Portable Area Mete



LI-3100 Area Meter

Le LI-3000 A est un planimètre portable. Il peut être combiné à un instrument à tapis roulant (LI-3050 A) pour des mesures rapides. La résolution est de 1 mm^2 ($1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$). Les largeurs maximale et minimale sont de 127 mm et de 1 mm. La vitesse d'avancement du tapis LI-3050 A est de 6,35 cm/s. Ce système n'est pas adapté aux aiguilles.



LI-3000 A combiné au LI-3050 A

Le LI-3100 est un planimètre conçu pour des mesures au laboratoire. La vitesse d'avancement du tapis est de 6,7 cm/s. Deux résolutions de 1 mm^2 et de $0,1 \text{ mm}^2$ sont disponibles. Pour la résolution de 1 mm^2 , les largeurs maximale et minimale sont de 254 mm et de 1,5 à 3 mm. Cette résolution n'est pas adaptée aux aiguilles de conifères. Pour la résolution de $0,1 \text{ mm}^2$, la largeur maximale est de 75 mm et minimale de 0,5 à 1,5 mm.

Méthode de déplacement de volume

Cette méthode permet de mesurer la surface totale des aiguilles à partir du volume d'une pousse intacte ou d'un échantillon. La pousse est introduite dans un bac d'eau en la maintenant sans qu'elle touche les parois. Le volume de la pousse est donné par le volume d'eau déplacé. La surface totale est ensuite mesurée à partir d'une relation entre le volume d'aiguilles, leur longueur moyenne, leur nombre et un facteur de correction. Le protocole présenté est celui proposé par Norman J.M., dans le cadre du projet BOREAS Boreal Ecosystem-Atmosphere Study (Norman J.M., communication personnelle).

- Un bac est rempli d'eau associé à un détergent (3 à 5 % du volume). Le détergent permettra d'éviter que de fins films d'air se forment autour des aiguilles et limite les effets d'absorption. Le bac plein est ensuite placé sur une balance électronique qu'on remet à zéro.
- La pousse, pour laquelle on désire mesurer la surface totale des aiguilles, est introduite dans le bac en la maintenant sans qu'elle touche les parois du bac. Le volume d'eau déplacé correspond au volume de la pousse (aiguilles et parties ligneuses). Ce volume, exprimé en cm^3 , correspond à l'augmentation de la masse affichée sur la balance. Notons que sans détergent, Norman J.M (communication personnelle) observe une surestimation du 35 à 39 % du volume pour le sapin douglas.
- Pour des mesures plus précises, les aiguilles peuvent être enlevées de la pousse. On détermine ensuite de la même manière le volume des seules parties ligneuses. Le volume des aiguilles est obtenu en soustrayant le volume des parties ligneuses du volume total (aiguilles + parties ligneuses). Notons que le volume des parties ligneuses est de 5 à 15 % du volume total (Norman, communication personnelle).
- On détermine le nombre total d'aiguilles ainsi que leur longueur moyenne. Cette dernière est mesurée sur un échantillon de 10 à 20 aiguilles, distribuées tout le long de la pousse.
- La forme de la section de l'aiguille, qu'on note A , est ensuite déduite à partir d'observations au microscope. Cette forme est spécifique à chaque espèce et elle n'est donc caractérisée qu'une seule fois. On détermine ensuite le périmètre moyen P et la surface moyenne de la section A .

La surface totale des aiguilles peut être déduite de leur volume. En effet, pour le n aiguilles de la pousse, la surface S est donnée par : $S = n L P$. Avec n le nombre total des aiguilles de la pousse, L la longueur moyenne de l'aiguille et P le périmètre de la section. Le volume V est égal : $V = n L A$

On définit un facteur de forme qu'on note μ : $\mu = \frac{P}{A}$ d'où $S = n L \mu A$

En remplaçant A par $\frac{V}{nL}$, on obtient l'expression de la surface totale S sous la forme suivante : $S = \mu \frac{V}{nL}$

Le tableau suivant donne l'expression de S pour différentes sections d'aiguilles (d'après Norman J.M, communication personnelle) :

Forme de la section de l'aiguille	Surface	Espèces
Carré	$S = 4,00 \sqrt{VnL}$	Epicéa
Ellipsoïde (ratio d'axes 1:3)	$S = 4,17 \sqrt{VnL}$	Sapin Douglas
Cylindre	$S = 3,54 \sqrt{VnL}$	<i>Pinus cembroïdes</i>
Hemi-cylindre	$S = 4,10 \sqrt{VnL}$	Pin noir, Pin sylvestre
Rectangle		
Largeur = 1/10 de la longueur	$S = 6,96 \sqrt{VnL}$	
Largeur = 1/4 de la longueur	$S = 5,00 \sqrt{VnL}$	
Largeur = 1/3 de la longueur	$S = 4,62 \sqrt{VnL}$	
Largeur = 1/2 de la longueur	$S = 4,24 \sqrt{VnL}$	

L'estimation de la surface des aiguilles par la méthode de déplacement de volume nécessite donc de déterminer le volume déplacé V , le nombre d'aiguilles par pousse, noté n , et la longueur moyenne L de l'aiguille à partir d'un échantillon de 10 à 20 aiguilles. Cette longueur doit être recalculée à chaque estimation.

Mesure de l'indice foliaire en forêt

Diffusé par ECOFOR

© Photos de couverture fournies par le ministère de l'Agriculture
et de la Pêche et Jean-Claude Borie

Maquette et mise en pages
Patricia Doucet (06 82 29 99 80)

Imprimerie
Nouvelle Imprimerie Laballery, Clamecy

dépôt légal : 4^e trimestre 2002
ISBN 2-914770-02-2